

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Двойной пульсар, гравитационные волны и Нобелевская премия

К.М. Уилл

PACS numbers: 97.60.G, 04.30.+x

Наверное, Джо Тэйлор и Расселл Халс никогда не забудут лето 1974 г. Оно началось без особых событий. Тэйлор, тогда еще молодой профессор Массачусетского университета в Армхёрсте, устроил своего студента Халса на летние каникулы на радиотелескоп в Аресибо в Пуэрто-Рико для наблюдений за пульсарами. Ими совместно была разработана хитроумная техника наблюдений, которая позволяла сканировать значительную часть неба при максимальной чувствительности радиотелескопа именно к пульсарным сигналам. К тому времени было открыто свыше 100 пульсаров, и главная цель этих наблюдений была пополнить этот список в надежде, что рост их числа позволит лучше изучить этот класс астрономических объектов. Однако, если не считать возможный успех в конце наблюдений, большая часть лета должна была бы пройти за проведением довольно рутинных, повторяющихся наблюдательных программ и сбора данных. Это занятие, как бывает и в случае многих других поисковых астрономических наблюдений, граничило со скукой.

Но 2 июля произошло необычное событие. В этот день почти по чистой случайности Халс обнаружил нечто, из-за чего имена Халса и Тэйлора оказались в заголовках всех астрономических новостей, взволновало сообщество астрофизиков и релятивистов и в конечном счете привело к первому подтверждению одного из наиболее интересных и важных предсказаний общей теории относительности. В конце концов из-за этого открытия они попали в 1993 г. в Стокгольм, где им была вручена Нобелевская премия 1993 г. Наконец, что касается специалистов по ОТО, для них это открытие по значимости сравнимо разве что с открытием самих пульсаров.

Пульсары были обнаружены совершенно случайно. В конце 1967 г. радиоастрономы Джоселин Белл и Энтони Хьюиш из Кембриджского университета занялись изучением явления сцинтилляций радиоисточников — быстрых вариаций, или "мерцаний", радиосигнала от космических источников, обусловленных прохождением его через облака электронов в истекающем в межпланет-

ное пространство солнечном ветре. Эти вариации по природе своей имеют случайный характер и ослабевают ночью, когда телескопы направлены от Солнца. И вдруг среди ночи 28 ноября 1967 г. Белл, которая в то время была еще студенткой, зарегистрировала последовательность необычайно сильных, удивительно регулярных всплесков сигнала. После месяца дальнейших наблюдений она и Хьюиш установили, что источник этих сигналов находится за пределами Солнечной системы и что сигнал представляет собой набор регулярно чередующихся импульсов с периодом 1,3373011 с. Взятые за стандарт измерения временных промежутков, эти импульсы не уступали по точности атомным часам того времени. Существование естественного астрофизического источника с таким регулярным периодом было настолько неожиданным, что в течение некоторого времени ими серьезно рассматривалась идея разумного происхождения этого сигнала, посылаемого какой-то внеземной цивилизацией. Они даже окрестили свой источник LGM (от *англ.* little green men — маленькие зеленые человечки). Вскоре кэмбриджские астрономы открыли еще три подобных источника, период которых лежал в диапазоне от четверти до одной с четвертью секунды; впоследствии новые открытия стали делаться и на других обсерваториях. Гипотеза маленьких зеленых человечков скоро отпала, и объекты были названы "пульсарами" по своему пульсирующему радиоизлучению.

Это открытие имело огромные последствия для всей астрономии. Статья, в которой сообщалось об открытии пульсаров, была опубликована в журнале "Nature" от 24 февраля 1968 г., и за оставшиеся 10 месяцев этого года было опубликовано более 100 статей, сообщавших о наблюдениях пульсаров или предлагавших их теоретическую интерпретацию. За открытие пульсаров в 1974 г. Хьюишу вместе с сэром Мартином Райлом, одним из пионеров Британской радиоастрономической программы, была присуждена Нобелевская премия по физике. В некоторых кругах до сих пор ходят споры о решении Шведской Академии, не включившей мисс Белл в число лауреатов.

В течение нескольких лет после этого открытия между наблюдателями и теоретиками было в целом достигнуто согласие о природе пульсаров, хотя многие подробности до сих пор остаются невыясненными. Хорошей аналогией пульсаров является космический маяк — вращающийся узконаправленный пучок радиоволн (а в некото-

Клиффорд М. Уилл (Clifford M. Will), McDonnell Center for the Space Sciences, Department of Physics, Washington University in St. Louis, Missouri, USA  
Tel. (314) 935-6244  
E-mail: cmw@wuphys.wustl.edu

рых случаях также и оптических, рентгеновских и гамма-лучей), пересекающий луч зрения земного наблюдателя один раз за период вращения. Сам вращающийся объект является нейтронной звездой — компактным небесным телом высочайшей плотности с массой примерно равной массе Солнца, но сжатой в сферу около 20 км в поперечнике, что в 500 раз меньше белого карлика той же массы. Следовательно, плотность такой звезды около  $5 \cdot 10^{14}$  г см<sup>-3</sup>, что сравнимо с плотностью внутри атомного ядра. Такая звезда в основном состоит из нейтронов с добавлением некоторого количества протонов и равного им числа электронов. Благодаря своей высокой плотности вращающаяся нейтронная звезда подобна гигантскому маховику, вращение которого остается постоянным из-за неспособности тормозящих сил преодолеть колоссальную инерцию. На самом деле все же существует небольшая сила трения между нейтронной звездой и окружающей средой, которая замедляет ее вращение, однако представление о малости этой силы можно получить, посмотрев на первый открытый пульсар: скорость увеличения его периода 1,3373... с составляет всего 42 нс за год. Поведение каждого из примерно 100 известных к 1974 г. пульсаров описывалось общим правилом: пульсар излучает короткие радиоимпульсы (с периодом от долей секунды до нескольких секунд), причем эти периоды чрезвычайно стабильны, если не считать очень медленного увеличения. Мы увидим, что слепое следование этому правилу могло бы погубить открытие Халса и Тэйлора.

Однако другие аспекты феномена пульсаров были (и до сих пор остаются) не так хорошо поняты; одним из них является подлинный механизм формирования "луча маяка", если на самом деле радиоимпульсы образуются таким образом. В стандартной модели предполагается, что пульсар обладает одним важным свойством, общим и для Земли: северный и южный полюсы магнитного поля пульсара не совпадают с направлением оси вращения. Но есть одно ключевое отличие. Магнитное поле пульсара в  $10^{12}$  раз сильнее напряженности земного магнитного поля. Столь огромные магнитные поля приводят к появлению сил, вырывающих электроны и ионы с поверхности нейтронной звезды и ускоряют их до скоростей, близких к скорости света. По этой причине движущиеся частицы интенсивно излучают в радиоволновом диапазоне и в других областях электромагнитного спектра, а поскольку магнитное поле усиливается к полюсам, результирующее излучение оказывается сфокусированным наружу от северного и южного магнитных полюсов. Так как магнитная ось не совпадает с осью вращения, эти два пучка при вращении заметают некоторую часть неба, и если наблюдатель пересекается одним из этих пучков, он видит пульсар. Этот механизм чрезвычайно трудно разработать в деталях, что частично вызвано полным отсутствием в нашем распоряжении лабораторных исследований такого сильного магнитного поля и настолько плотного вещества, так что большая часть всех расчетов основывается на теории.

Тем не менее, несмотря на все трудности в построении полной физической картины пульсаров, к лету 1974 г. было достигнуто всеобщее согласие в понимании их основных свойств. Они представлялись быстровращающимися нейтронными звездами с очень стабильными периодами, чрезвычайно медленно уменьшающимися со временем. Было также ясно, что чем большее число

пульсаров мы знаем и чем подробнее их наблюдения, тем выше наши шансы понять подробности их природы.

Именно это обстоятельство и подтолкнуло Халса и Тэйлора к их исследованиям пульсаров. Приемная аппаратура на 1000-футовом радиотелескопе в Аресибо была настроена таким образом, что при вращении Земли за 1 час этим инструментом можно было наблюдать полосу неба шириной 10 угловых минут и длиной 3 градуса. В конце каждого дня наблюдений записанные данные направлялись в компьютер, где они исследовались на наличие пульсирующих сигналов со стабильным периодом. Если подозрительная последовательность импульсов находилась, то производилась проверка, не вызвана ли она какими-то причинами земного происхождения, или является случайным пульсирующим радиосигналом, например радарной помехой или радиопомехой, возникающей при зажигании двигателя автомобиля. Для этого достаточно было позже вернуться вновь к наблюдениям той области неба, которую сканировал радиотелескоп в момент регистрации подозрительного сигнала, и посмотреть, наблюдаются ли импульсы с тем же периодом. Если да, то появлялся хороший кандидат в пульсары, которым можно было бы заняться детальнее впоследствии, измеряя его период с характерной для других пульсаров микросекундной точностью; ну, а если нет — о таком сигнале можно было забыть.

Итак, в течение лета Халс методично занимался ежедневным выполнением этой программы, а Тэйлор время от времени приезжал из Армхёрста, чтобы следить за ее ходом, или звонил по телефону (это было до начала эры электронной почты). 2 июля Халс самолично присутствовал на телескопе, когда инструмент зарегистрировал слабый пульсирующий сигнал. Если бы сигнал был всего лишь на 4 % слабее, он бы автоматически оказался ниже установленного в обрабатывающей программе порога регистрации, который соответствовал семикратному отношению сигнала к шуму, и никогда не был бы записан. Несмотря на свою слабость, сигнал казался заслуживающим внимания, так как его период был удивительно мал — всего 0,059 с. Только пульсар в Крабовидной туманности имел более короткий период. Однако Халс смог вернуться к наблюдениям этого источника только 25 августа.

Задачей наблюдений 25 августа было уточнение периода импульсов. Если они принадлежали обычному пульсару, их период должен был оставаться неизменным с точностью до микросекунды на протяжении нескольких дней, потому что, даже если бы этот пульсар замедлялся, как Краб, замедление периода составило бы менее микросекунды. И вот здесь начались проблемы. Период пульсара, полученный при компьютерной обработке данных в начале и в конце двухчасовых наблюдений, отличался почти на 30 мкс. Спустя два дня Халс повторил наблюдения и получил еще худший результат. Это вынудило его заглянуть в запись лабораторного журнала об открытии этого пульсара и обработать старые данные с новым значением периода. Реакция Халса на результат была естественной: полное разочарование. Из-за слабости сигнала импульсы были нечеткими и размытыми в отличие от импульсов других пульсаров, и при компьютерном отождествлении импульсов, должно быть, возникали ошибки. Может быть, источник вообще не стоил затраченных на него усилий. В конце концов летние наблюдения уже дали богатый урожай в 40

новых пульсаров — значительный вклад в пульсарную астрофизику, так что среди найденных источников было достаточное число хороших кандидатов для дальнейших исследований. Если бы Халс и впрямь поддавался таким настроениям и вычеркнул открытый слабый источник, он и Тэйлор стали бы посмешищем астрономов на все десятилетие. Как оказалось, вьедливый Халс решил более внимательно посмотреть на эти данные.

В течение последующих нескольких дней Халс написал специальную компьютерную программу, которая могла обходить все возможные проблемы, возникающие при отождествлении импульсов. Но в данных наблюдений 1 и 2 сентября, обработанных даже и этой новой программой, также было замечено стабильное уменьшение периода пульсара примерно на 5 мкс за 2 ч. Это было значительно более медленное изменение, чем раньше, но все же достаточно сильное по сравнению с ожидаемым типичным значением. Идея переложить вину на технику или компьютер казалась соблазнительной, но не очень удовлетворительной.

И вот здесь Халс сделал одно замечательное наблюдение. В изменении периода пульсара была закономерность! Последовательность импульсов с замедляющимся периодом 2 сентября казалась почти полной копией последовательности, наблюдавшейся 1 сентября, но на 45 мин раньше. Теперь уже Халс был уверен, что изменение периода реально и не является артефактом.

Но тогда что же это было? Открыл ли он некоторый новый класс объектов — маниакально-депрессивный пульсар с периодическими увеличениями и уменьшениями периода? Или существовало какое-то более естественное объяснение такому странному поведению? Тот факт, что периоды почти повторяли друг друга, и дал Халсу ключ к объяснению. На самом деле источник был настоящим пульсаром, но он был не один!

Как постулировал Халс, пульсар вращался по орбите вокруг второго компонента, а переменность наблюдаемого периода пульсара просто была следствием эффекта Доплера. Когда пульсар приближался к нам, наблюдаемый период импульсов из-за доплер-эффекта уменьшался, а когда пульсар удалялся от нас, его период увеличивался. Действительно, этот эффект отлично известен оптическим астрономам, наблюдающим обычные звезды. Примерно половина звезд нашей Галактики входит в состав двойных систем. Поскольку при помощи телескопа редко удается разрешить каждую из звезд двойной системы, их отождествляют по переменному доплеровскому сдвигу частот спектральных линий одного из компонентов (рис. 1). В данном случае период пульсара играет роль спектральной линии обычной звезды. У большинства обычных двойных звездных систем наблюдаются доплеровские сдвиги в спектрах обоих компонентов, однако иногда одна из звезд оказывается слишком слабой для наблюдений, так что астрономам удается заметить движение только одной из звезд. Примерно то же самое оказалось и в данном случае. Кстати, обдумывая свою гипотезу, Халс столкнулся с чисто практической проблемой: в библиотеке Аресибо он не смог найти ни одной толковой книжки по оптическим двойным звездам, так как обычно радиоастрономы не задумываются над такими вещами.

Далее, поскольку телескоп в Аресибо мог следить только за радиоисточниками, находящимися на угловом расстоянии одного часа от зенита (отсюда двухчасо-

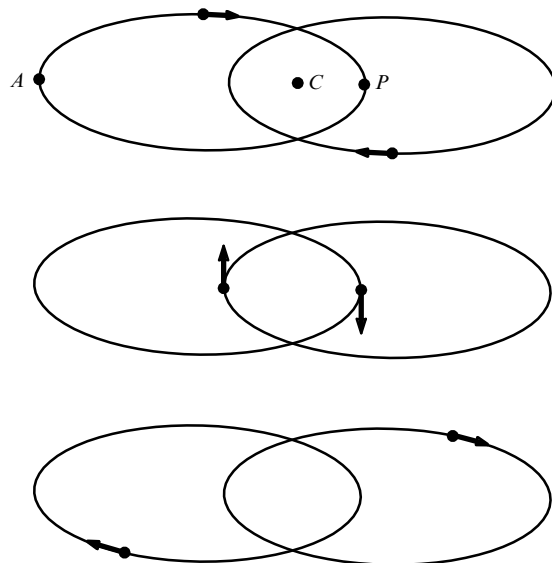


Рис. 1. Орбита двойной системы подобной двойному пульсару. Каждое тело движется по эллипсу вокруг общего центра масс  $C$  системы. Периастр орбиты одного тела находится в точке  $P$ , апоастр — в точке  $A$

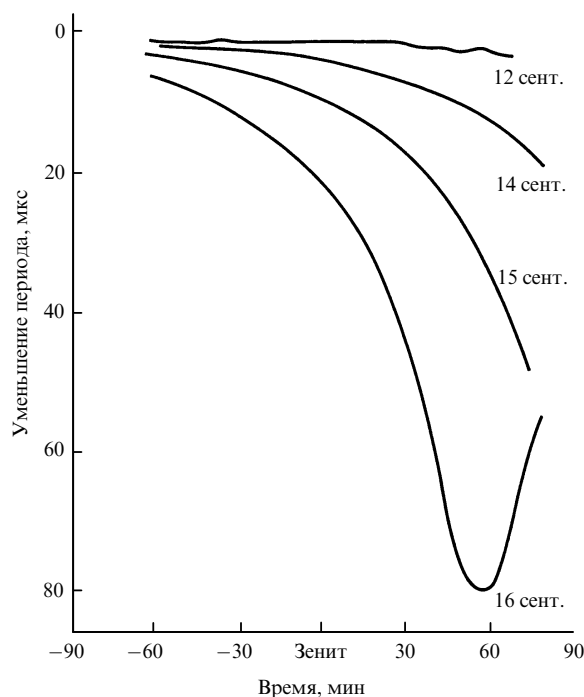


Рис. 2. Изменение периода двойного пульсара. Данные из журнала наблюдений Халса

вые наблюдения), Халс не мог часами следить за источником, а мог только наблюдать их те же два часа каждый день. Однако сдвиг последовательности периодов в данных 1 и 2 сентября означал, что орбитальный период этой двойной системы был несоизмерим с 24 часами, так что если и впрямь его предположение было верным, каждый день он мог изучать различные части орбиты. В четверг 12 сентября он начал серию наблюдений, которые, как он надеялся, смогли бы раскрыть тайну этого пульсара (рис. 2).

12 сентября период пульсара оказался постоянным в течение всего времени наблюдений. 14 сентября в начале

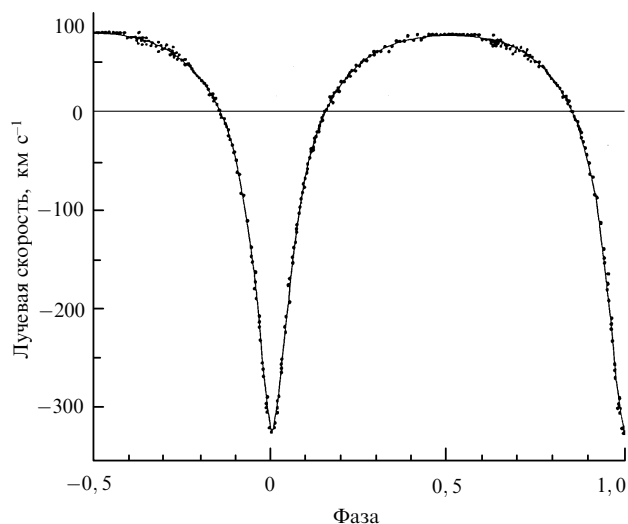


Рис. 3. Кривая лучевых скоростей для 1,5-орбитальных циклов двойного пульсара. Асимметричная форма кривой указывает на большой эксцентриситет. Периастр соответствует резкому провалу на кривой, апоастр — плоской части (любезно предоставлено Дж.Х. Тэйлором)

наблюдений он был тем же и уменьшился на 20 мкс за 2 часа. На следующий день, 15 сентября, период в начале наблюдений был несколько меньше и рухнул на 60 мкс, а к концу наблюдений он уменьшался на 1 мкс в минуту. Значит, проекция скорости пульсара на луч зрения должна была меняться сначала медленно, затем быстро. Гипотеза двойного пульсара становилась все привлекательнее, но Халс ждал, когда "пушка выстрелит", ждал решающего доказательства. До сих пор он наблюдал, как период уменьшается. Но если пульсар находится на орбите, его движение должно периодически повторяться, и тогда он в конце концов должен увидеть фазы, на которых период начнет увеличиваться и достигнет своего первоначального значения, тем самым замкнув орбитальный цикл.

Ему не пришлось долго ждать. Уже на следующий день, 16 сентября, период резко уменьшился на 70 мкс, и, когда до конца наблюдений оставалось только около 25 мин, он внезапно перестал уменьшаться, и за оставшиеся 20 мин период возрос на 25 мкс.

Это было все, что нужно, и он позвонил Тэйлору в Армхёрст, чтобы сообщить новость. Тэйлор немедленно прилетел в Аресибо, и вместе они попытались закончить разгадку этой тайны. Но настоящее открытие все еще было впереди.

Первым делом, найдя кратчайший промежуток времени, за который серии импульсов точно повторяли друг друга, они определили орбитальный период. Он оказался равным 7,75 ч, так что 45-минутный ежедневный сдвиг, который заметил Халсе, был просто разницей между тремя полными орбитальными периодами и одними земными сутками.

Следующий очевидный шаг состоял в слежении за вариациями пульсарного периода на орбите с целью определения скорости пульсара в зависимости от времени. Это стандартный подход при изучении обычных двойных звезд, который позволяет получить богатую информацию. Если на время встать на точку зрения ньютоновской теории гравитации, то известно, что орбита пульсара вокруг центра масс двойной системы

представляет собой эллипс с центром масс в фокусе. Орбита второго компонента тоже будет эллипсом с фокусом в этой точке, но поскольку компонент невидим, нам нет нужды напрямую заниматься его орбитой. Орбита пульсара лежит в плоскости, которая может быть произвольно ориентирована в пространстве. Она могла бы лежать в плоскости неба или наблюдаться с ребра, или быть как-то промежуточно ориентирована между этими крайними случаями. Первый случай можно отбросить, так как, будь это на самом деле, пульсар бы никогда не приближался и не удалялся от нас и мы бы не наблюдали никакого доплеровского сдвига его периода. Второй случай тоже не годится, потому что при этом в некоторой точке орбиты компонент оказывался перед пульсаром на луче зрения, и из-за затмения мы бы не наблюдали пульсар в течение некоторого времени. Ничего подобного не наблюдалось ни в одной точке 8-часовой орбиты. Следовательно, орбита должна быть наклонена под некоторым углом к плоскости неба.

Это еще не все, что можно узнать из поведения периода пульсара. По доплеровскому сдвигу периода пульсара мы можем судить только о проекции скорости пульсара на луч зрения, а проекция скорости на перпендикулярное направление остается неизвестной. Если бы, например, орбита была чисто круговой, то доплеровский сдвиг периода пульсара в зависимости от времени вел бы себя по синусоидальному закону, что полностью не соответствует наблюдаемому поведению (рис. 3). За очень короткое время (только два часа из восьми) доплеровский сдвиг изменяется от нуля до большого значения и обратно, что соответствует прохождению пульсара через периастр — точку орбиты, в которой расстояние между обоими телами минимально. В оставшиеся шесть часов сдвиг периода медленно изменяется от нуля до меньшего значения с другим знаком и вновь обращается в нуль, что соответствует прохождению пульсаром апоастра орбиты. И действительно, в "поставивших точку" наблюдениях 16 сентября как раз и наблюдалось прохождение пульсара через периастр. Из детального изучения полученной кривой был сделан вывод, что расстояние между двумя телами в апоастре было в четыре раза больше расстояния в периастре, что соответствует эксцентриситету орбиты около 0,6. Из вида кривой также следовало, что направление на периастр было почти перпендикулярно нашему лучу зрения, поскольку периастр (точка максимального изменения скорости) совпал с максимальным значением доплеровского сдвига периода пульсара (точка, где трансверсальная скорость пульсара по отношению к лучу зрения минимальна).

Вот с этого момента дело стало принимать по-настоящему серьезный оборот. Как следовало из наблюдений уменьшения периода пульсара, действительное значение скорости, с которой пульсар приближался к наблюдателю, было около 300 км/с! Скорость удаления была около 75 км/с. Это действительно огромные скорости! Орбитальная скорость Земли вокруг Солнца только 30 км/с. Более того, если средняя орбитальная скорость пульсара, грубо говоря, 200 км/с, то длина пути, проходимого пульсаром за 8 ч, составляла около 6 млн. км, т.е. примерно равнялась длине солнечного экватора.

Известие об этом открытии стало распространяться в конце сентября 1974 г. и произвело настоящую сенсацию, особенно среди специалистов по ОТО, чему были веские основания. И в лабораторных условиях, и среди астрономических объектов релятивисты постоянно ищут физические системы, для которых релятивистские эффекты могут оказаться важными. Они определяют это двумя способами. Во-первых, вычисляется величина  $(v/c)^2$  — квадрат отношения характерной скорости движения тела системы  $v$  к скорости света  $c$ . Чем ближе эта величина к единице, тем существеннее релятивистские эффекты и тем счастливее релятивисты. В случае пульсара Халса–Тэйлора со скоростью  $200 \text{ км с}^{-1}$  эта величина составляет  $5 \cdot 10^{-7}$ . Это не так много, но все же велико по сравнению с соответствующей величиной для Меркурия — объекта, в движении которого, как известно, релятивистские поправки проявляются в смещении перигелия орбиты. Для Меркурия ( $48 \text{ км с}^{-1}$ ) это отношение равно  $2,5 \cdot 10^{-8}$ , т.е. в 20 раз меньше. Во-вторых, релятивисты оценивают величину  $GM/Rc^2$ , где  $M$  — характерная масса тела,  $G$  — гравитационная постоянная и  $R$  — характерный размер (в нашем случае это расстояние между двумя телами). Эта величина является грубой мерой того, насколько велики отклонения от плоского пространства-времени вблизи системы, и чем они больше, тем интереснее. Например, для черной дыры это отношение равно 0,5. Две нейтронных звезды солнечной массы каждая, входящие в состав двойной системы с параметрами двойного пульсара, дали бы значение, близкое к  $4 \cdot 10^{-6}$ , в то время как в случае Меркурия, обращающегося вокруг Солнца, она равна  $2,5 \cdot 10^{-8}$ . Это обстоятельство привело специалистов по ОТО в полный восторг, ибо показывало, что орбита этого пульсара была от 20 до 100 раз более релятивистской, чем орбита Меркурия. Но это было еще не все. Поскольку орбитальный период пульсара был всего лишь около 8 часов, в течение года можно было наблюдать более 1000 оборотов системы, так что любой релятивистский эффект, который накапливается в движении от одной орбиты к другой (как, например, сдвиг периастра — аналог смещению перигелия орбиты в Солнечной системе), достигал бы заданной величины в 250 раз быстрее, чем в случае Меркурия, который за год делает только 4 оборота вокруг Солнца.

Немедленно стало ясно, что эта новая система, названная двойным пульсаром или PSR 1913+16 по своему обозначению в каталоге пульсаров, является новой лабораторией по наблюдению эффектов общей теории относительности, притом лабораторией уникальной, находящейся за пределами Солнечной системы. За последние месяцы 1974 г. релятивисты и астрофизики буквально завалили редколлегию журнала "The Astrophysical Journal Letters" статьями, превозносящими достоинства этой новой системы и описывающими всевозможные релятивистские эффекты, которые можно было бы в ней наблюдать. В течение восьминедельного периода в начале 1975 г. в добавление к статье Халса и Тэйлора, сообщавшей об этом открытии, только в этом журнале опубликованы семь статей такого рода. За период времени с 1975-го по 1977 г. в различных астрономических журналах мира было напечатано свыше 40 статей, либо сообщавших результаты наблюдений, либо содержащих теоретические предсказания. Эти цифры не превзошли количества статей, вышедших после

открытия пульсаров, однако они свидетельствовали об огромной трудоемкой работе, проделанной по исследованию одного этого объекта.

Еще до того, как статья Халса и Тэйлора об открытии двойного пульсара вышла из печати (однако слишком поздно, чтобы остановить ее появление), Тэйлор с сотрудниками обнаружили первый из наиважнейших релятивистских эффектов — смещение периастра орбиты. Как мы отмечали, уже из первых наблюдений доплеровских сдвигов периода пульсара был сделан вывод о том, что направление на периастр орбиты было перпендикулярно лучу зрения. Однако дальнейшие наблюдения показали, что направление на периастр орбиты медленно поворачивается со скоростью примерно в треть градуса в месяц. За два с половиной месяца наблюдательной программы, законченной в декабре 1974 г., Халсу и Тэйлору удалось измерить этот поворот. В это время должен был начаться Седьмой Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике в Далласе. Обработка данных завершилась как раз вовремя, что дало возможность Тэйлору доложить 20 декабря на этом симпозиуме, что смещение периастра орбиты в этом пульсаре составляет  $4,0 \pm 1,5$  градуса в год. Спустя четыре года Тэйлор вернется на этот симпозиум с еще более сенсационными результатами.

Измеренная скорость поворота периастра орбиты в двойном пульсаре была примерно в 36 000 раз больше смещения перигелия орбиты Меркурия, что соответствовало ожиданиям: фактор 20–100 набирался за счет грубой оценки величины релятивистских эффектов и фактор 250 — по числу орбит в год. Это ли не триумф общей теории относительности? Да, это так, но не совсем в очевидном смысле. Дело в том, что предсказываемый ОТО сдвиг периастра двойной системы пропорционален суммарной массе входящих в систему тел. Он также зависит от других переменных, таких, как орбитальный период и эксцентриситет орбиты, а эти последние непосредственно выводятся из наблюдений. К сожалению, мы не можем оценить массы тел с достаточной степенью точности. Нам известно только, что они, вероятно, должны быть сравнимы с массой Солнца, чтобы обеспечить наблюдаемую величину орбитальной скорости, измеряемой по эффекту Доплера. Более точно сказать о массах тел нельзя из-за незнания наклона орбиты двойной системы по отношению к плоскости неба. Но тогда, если мы не можем проверить ОТО, измеряя смещение периастра орбиты, что же в этом хорошего?

В действительности же ценность этих наблюдений необычайно высока, потому что мы можем обратить ход рассуждений и с помощью ОТО "взвесить" двойную систему! Если предположить, что ОТО верна, то наблюдаемая скорость смещения периастра будет зависеть только от одной неизвестной переменной — суммарной массы двух тел. Следовательно, измеренный сдвиг периастра говорит о том, какой должна быть полная масса двойной системы. Выведенная из результатов наблюдений конца 1974 г. полная масса была около 2,6 солнечных масс. В конце концов темп поворота периастра был измерен настолько точно:  $4,22663$  градуса в год, что полная масса системы оказалась равной  $2,82843$  массы Солнца. Это был триумф ОТО. В данном случае впервые эта теория была использована в прикладных целях при проведении астрофизических наблюдений, для определе-

ния массы двойной системы с точностью до нескольких миллионов долей.

Интуитивное чувство релятивистов, что эта система могла бы быть новой лабораторией по проверке эйнштейновской теории, не подвело. Однако впереди были новые результаты.

В течение первых нескольких месяцев наблюдений стало ясно, что этот пульсар очень необычен сам по себе, сверх того, что он находится в двойной системе. Так как наблюдаемые периодические изменения значения его периода связывались с движением пульсара по орбите, их можно было точно учесть и исследовать оставшиеся изменения периода вращения пульсара так, как если бы он покоился относительно наблюдателя. Собственный период пульсара равнялся 0,05903 с, и если бы замедление вращения пульсара происходило так же, как и у других пульсаров, то оно было бы невероятно малым. Потребовался почти целый год наблюдений, чтобы обнаружить какие бы то ни было изменения периода пульсара, и когда было накоплено достаточно данных, чтобы их увидеть, скорость торможения пульсара оказалась равной всего четверти наносекунды в год. Эта величина была в 50 000 раз меньше скорости торможения пульсара в Крабе. Это означало, что любые силы, тормозящие вращение этой нейтронной звезды, были чрезвычайно малы. При такой скорости замедления пульсар изменил бы свой период только на 4 % за миллионы лет. Стабильность и постоянство этого пульсара делали его одним из лучших известных естественных часов во Вселенной!

Это обстоятельство позволяло измерять вызванные орбитальным движением вариации периода со все возрастающей точностью. Пульсар был настолько стабилен, что Тэйлор и его сотрудники могли предсказать время прихода конкретного импульса, принимаемого радиотелескопом, даже если в силу каких-то обстоятельств наблюдения за пульсаром прерывались на срок до шести месяцев, в течение которых наблюдатели возвращались в свои университеты для таких обычных дел, как обучение студентов, или пока телескоп был занят другими наблюдательными программами. В конце концов точность, с которой определялись характеристики пульсара и его орбиты, начала казаться умопомрачительной: собственный период пульсара равнялся 0,059 029 997 929 613 с, скорость возрастания собственного периода пульсара была 0,272 246 нс в год, скорость смещения периастра орбиты была 4,22663 градуса в год, орбитальный период составлял 27 906,980 895 с. Поскольку период пульсара каждый год изменяется на указанную величину в трех последних цифрах, приведенные выше величины обычно относят к какой-нибудь определенной дате; в данном случае они приведены на 7 июля 1984 г.

Однако за впечатляющими цепочками точных цифр скрывался более глубокий смысл. Эта точность позволила получить дальнейшие релятивистские дивиденды.

Первым из них оказался другой пример "прикладной относительности", или теории относительности, выступающей в качестве рабочего инструмента астрофизика. Период пульсара, помимо обычного доплеровского сдвига, изменяется еще по двум причинам, релятивистским по своей природе. Первый эффект представляет собой замедление времени в частной теории относительности: так как пульсар движется вокруг компонента с

высокой скоростью, период следования импульсов, измеренный неким наблюдателем, у которого хватило глупости сидеть на поверхности пульсара (естественно, он немедленно будет раздавлен гравитацией до ядерной плотности), будет короче периода, наблюдаемого нами. Другими словами, с нашей точки зрения пульсарные часы замедляются вследствие большой скорости движения. Поскольку скорость движения по орбите меняется от максимального значения в периастре до минимального в апоастре, величина замедления времени будет переменной, но повторяющейся от орбиты к орбите. Второй релятивистский эффект — гравитационное красное смещение, следствие принципа эквивалентности общей теории относительности. Пульсар движется в гравитационном поле своего компонента, в то время как мы наблюдаем пульсар с очень далекого расстояния; поэтому наблюдаемый период пульсара будет смещен в красную сторону, т.е. будет казаться длиннее. Это удлинение периода тоже переменное, потому что расстояние между пульсаром и вторым компонентом меняется от периастра к апоастру, но также повторяется от орбиты к орбите. Суммарным результатом этих двух эффектов будут периодические увеличения и уменьшения наблюдаемого периода пульсара относительно вариаций, вызванных обычным доплеровским смещением. Однако поскольку относительное изменение периода вследствие эффекта Доплера составляет около  $10^{-3}$ , эти эффекты, будучи чисто релятивистскими, изменяют период на  $10^{-6}$  долю. Измерить столь малые периодические вариации чрезвычайно трудно ввиду неизбежного шума и флуктуаций в таком предельно слабом сигнале, но за четыре года непрерывных наблюдений и улучшения их методики эффект был обнаружен на уровне 58 нс в изменении периода пульсара. И опять, как в случае с периастром, эти измерения сами по себе ничего не проверяли, потому что величина предсказываемого эффекта оказалась зависимой от другого неизвестного параметра, а именно, от относительной массы тел в двойной системе. Из величины поворота периастра орбиты мы получаем информацию о полной массе двух тел, но не о массе каждого тела. Следовательно, мы опять можем стать "прикладными релятивистами" и использовать измеренную величину этого нового эффекта для определения отношения масс тел. В результате оказалось, что массы тел в этой двойной системе должны быть практически одинаковыми, т.е. при полной массе в 2,8275 массы Солнца масса пульсара должна быть около 1,42 массы Солнца, а масса невидимого компонента около 1,40 массы Солнца с точностью примерно 2 %. Так, понимание и использование релятивистских эффектов сыграло ключевую роль в первом точном определении массы нейтронной звезды.

Результаты определения масс двух тел были интересны еще и потому, что они соответствовали представлениям астрофизиков о природе компонента пульсара. Поскольку этот компонент никогда не наблюдался ни в оптическом, ни в радио-, ни в рентгеновском диапазоне, нам предстоит проделать некоторую детективную работу, чтобы определить, что мог бы из себя представлять второй компонент. Он наверняка не мог быть обычной звездой типа Солнца, так как его орбитальное расстояние до пульсара всего лишь около солнечного радиуса. Если бы компонент был звездой типа Солнца, пульсару пришлось бы продираться сквозь его верхнюю

атмосферу, состоящую из горячего газа, а это вызвало бы значительные искажения радиоимпульсов, распространяющихся сквозь плазму, чего не наблюдалось. Следовательно, компонент должен быть гораздо меньше, хотя и весить полторы массы Солнца. Такие астрономические объекты называют "компактными", и их известно только три типа: белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. В настоящее время самым перспективным кандидатом в компоненты пульсара является другая нейтронная звезда. Этот вывод основан на компьютерном моделировании эволюции массивной двойной системы, из которой после нескольких вспышек сверхновых могла бы образоваться подобная двойная система, состоящая из двух нейтронных звезд — эволюционного "пепла" массивных звезд. Тот факт, что обе массы оказались примерно равными друг другу, находится в согласии с отмеченным во всех компьютерных моделях сверхновых фактом, что ядра звезд перед взрывом имеют массу, близкую к 1,4 массы Солнца. После потери во время взрыва каждой звездой своих внешних частей остаются нейтронные звезды с массой, примерно равной массе ядра. Эта масса называется массой Чандрасекара, по имени астрофизика С. Чандрасекара, определившего в 1930 г., что такая масса является максимально возможной для белого карлика (за это открытие в 1983 г. была присуждена часть Нобелевской премии по физике, называемая "Чандра"). А так как ядро предсверхновой во многих отношениях напоминает белый карлик, неудивительно, что эта выделенная масса появляется также и в этой задаче.

Так почему же мы не видим второй компонент? Поскольку расстояние до двойного пульсара оценивается в 16 000 световых лет, ни белый карлик, ни облако горячего газа, падающего в черную дыру, не могут выделить достаточно энергии, чтобы быть зарегистрированными с Земли. Нейтронная звезда в качестве второго компонента также будет слишком тусклой, чтобы быть замеченной с Земли, если только она сама не является пульсаром. Однако нет абсолютно никаких свидетельств о каком-либо пульсирующем радиоизлучении сверх того, которое генерируется основным пульсаром, так что, если второй компонент и является пульсаром, его вращающийся луч должен быть направлен в каком-то другом направлении. Возможно, некая удаленная развитая цивилизация со своими собственными [исследователями] Халсом и Тэйлором наблюдает тот пульсар и гадает о природе его компонента! Принятый в настоящее время сценарий в действительности предполагает, что второй компонент является мертвой нейтронной звездой, совсем не излучающей значительный пульсирующий сигнал. По этому сценарию пульсар, который мы сейчас наблюдаем, на самом деле уже однажды "умер", а потом заново родился при ускорении до очень высокой скорости вращения из-за трения в атмосфере своего компонента, пока тот еще был нормальной звездой. Когда же компонент в свою очередь взорвался, как сверхновая, а ядро его сколлапсировало в нейтронную звезду, оставшийся от него пульсар замедлился и угас, как и большинство пульсаров, за относительно короткое время, а потом, не имея второго компонента с протяженной атмосферой, уже не имел никакой возможности заново включиться.

И все же главный результат исследования двойного пульсара был еще впереди. Чтобы понять, что это был за

результат, мы должны сделать исторический экскурс сначала в 1916 г., потом в конец 1960-х годов и, наконец, в 1968 г. в Мюнхен, Германия.

Эйнштейн не хотел, чтобы дело кончилось только публикацией общей теории относительности, и в течение нескольких лет он продолжал изучать некоторые следствия этой теории, прежде чем переключил главное свое внимание на поиски общей теории поля, которые, как известно, ждала печальная участь. Одним из этих следствий были гравитационные волны. В соответствии с частной теорией относительности скорость света является предельной скоростью любых взаимодействий. ОТО строилась таким образом, чтобы на некотором уровне не противоречить частной теории относительности, так что естественно было ожидать, что предельная скорость гравитационного взаимодействия была такой же; из этого следовал вывод о существовании гравитационных волн.

И действительно, уравнения ОТО допускают решение в виде гравитационных волн. Например, гантель, вращающаяся вокруг перпендикулярной к своей ручке оси, будет излучать распространяющиеся со скоростью света гравитационные волны. Эйнштейн заметил также, что гравитационные волны обладают одним очень важным свойством: они уносят энергию от вращающейся гантели точно так же, как световые волны уносят энергию от источника света. Он даже вывел формулу для определения скорости, с которой энергия должна была уноситься от системы, подобной вращающейся гантели, из-за излучения гравитационных волн. Как оказалось, упрощающие предположения, введенные Эйнштейном, не были полностью корректными, и он также допустил простую математическую ошибку в вычислениях, из-за чего его ответ был в два раза больше, но основной результат все же был верным.

Статья Эйнштейна о гравитационных волнах была опубликована в 1916 г., и это было все, что было известно о гравитационных волнах на протяжении свыше 40 лет. Одной из причин была чрезвычайная малость эффектов, производимых гравитационными волнами. Другая причина состояла в том, что долгое время был спор о том, "реальны" ли гравитационные волны, или же они просто артефакт математических выкладок, которые не имеют наблюдаемых последствий. Однако к 1960 г. к идее о гравитационных волнах вернулись по двум обстоятельствам. Во-первых, было строго теоретически доказано, что гравитационное излучение было действительно физически наблюдаемым явлением, что гравитационные волны переносят энергию и что система, излучающая гравитационные волны, должна в результате терять свою энергию. Второй причиной послужило решение Джозефа Вебера из Мэрилендского университета начать строительство детекторов гравитационных волн от внеземных источников.

К 1974 г. гравитационное излучение уже было в центре внимания, и релятивисты умирали от желания хоть как-нибудь найти его. Хотя Вебер провозгласил детектирование гравитационных волн еще в 1968 г., его результаты не были подтверждены в более поздних экспериментах, проводившихся другими группами, так что общее мнение состояло в том, что гравитационные волны еще не обнаружены. Поэтому, когда был открыт двойной пульсар и стало ясно, что он является новой лабораторией по проверке релятивистских эффектов, он

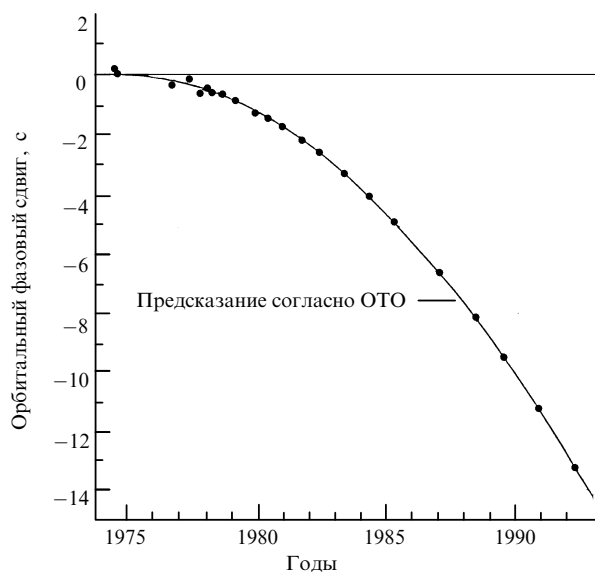


Рис. 4. Влияние уменьшения орбитального периода на фазу двойного пульсара. Пульсар проходит через периастр все раньше и раньше по мере уменьшения периода. Сплошная линия соответствует предсказанию общей теории относительности для измеренных значений масс компонент двойного пульсара. Точками нанесены данные наблюдений. Экспериментальные ошибки меньше размера точек (любезно предоставлено Дж.Х. Тэйлором)

показался просто манной небесной. Ибо если вращающаяся гантель может излучать гравитационные волны, то же может делать и вращающаяся двойная система, хотя в отличие от гантели, у которой две массы соединены жестким стержнем, две звезды в двойной системе удерживаются благодаря гравитации (вообще, с точки зрения ОТО совершенно не важно, что удерживает их друг возле друга). Таким образом, двойной пульсар мог быть использован для поиска гравитационных волн, хотя и не в очевидном смысле. Из-за большого расстояния до двойного пульсара излучаемые им гравитационные волны настолько ослабевают, пока доходят до Земли, что не могут быть зарегистрированы никаким детектором даже в обозримом будущем. С другой стороны, если гравитационное излучение уносит энергию от системы, орбитальная энергия двойной звезды должна уменьшаться. Потеря орбитальной энергии проявляется в ускорении движения двух тел и в уменьшении размеров орбиты. Те же процессы происходят, например, при торможении искусственного спутника Земли из-за трения в разреженной верхней атмосфере; по мере его падения на Землю он движется быстрее и быстрее, хотя его полная энергия уменьшается, в данном случае превращаясь в тепло. В случае двойного пульсара ускорение движения в совокупности с уменьшением орбиты выразится в уменьшении орбитального периода.

В этом и состоял — хотя и несколько косвенный — способ детектирования гравитационных волн, на что указали несколько релятивистов вскоре после открытия двойного пульсара в конце 1974 г. Как я упомянул выше, производимые гравитационным излучением эффекты ничтожно слабы, и уменьшение орбитального периода не представляло исключения. Предсказанная скорость уменьшения 27 000-секундного орбитального периода была порядка нескольких десятков микросекунд в год. Несмотря на то, что это была волнующая возможность,

малость эффекта приводила в уныние, и некоторые специалисты думали, что понадобится от 10 до 15 лет непрерывных наблюдений, чтобы обнаружить его. Может быть, — к 1990 г. ...

Теперь перенесемся на четыре года вперед, в декабрь 1978 г., на Девятый Техасский симпозиум по релятивистской астрофизике, который на сей раз собрался в Мюнхене, Германия. В программе был заявлен доклад Джо Тэйлора по двойному пульсару. Ходил слух, что он сделает важное заявление, и только несколько осведомленных сотрудников да теоретиков, активно работающих над проблемой двойного пульсара, знали, что это было за сообщение (я тоже знал, потому что мой доклад шел следом за докладом Тэйлора и был посвящен теоретической интерпретации его результатов). В конце дня намечалась пресс-конференция. В очень четком, кратком, 15-минутном докладе (более пространная и подробная лекция планировалась на следующий день) Тэйлор подвел черту: только после четырех лет накопления и анализа данных им удалось обнаружить уменьшение орбитального периода двойной системы, количественно согласующееся с предсказанием общей теории относительности в пределах 20 %-ной ошибки наблюдений. Это превосходное подтверждение важного предсказания теории положило хорошее начало празднованию столетнего юбилея Эйнштейна в 1979 г.

Оказалось, что невероятная стабильность пульсарных часов в сочетании с изысканной и утонченной техникой получения и обработки данных с телескопа в Аресибо, которую разработали Тэйлор и его команда, привела к такому увеличению точности, что они были способны обнаружить эффект за гораздо более короткий срок, чем отведенные на его поиски 10 лет. Это были те же улучшения, которые в то же время позволили им измерить эффекты гравитационного красного смещения и замедления времени и таким образом отдельно определить массы пульсара и его компонента. Это было важно, потому что предсказываемая ОТО скорость потери энергии зависит как от этих масс, так и от других параметров системы, а значит, они должны быть известны до того, как делать определенные предсказания. К 1991 г. точность наблюдений достигла такой величины, что массы компонентов, определенные отдельно, равнялись 1,4411 и 1,3874 массы Солнца с точностью до 0,05 %. Для этих значений масс ОТО предсказывает уменьшение орбитального периода на 75,8 мкс в год. Как недавно сообщили Тэйлор и коллеги, уменьшение орбитального периода по данным, накопленным до 1991 г., составляет  $76,0 \pm 0,3$  мкс в год (рис. 4).

В настоящее время открыто свыше 40 двойных пульсаров, некоторые из которых могут быть использованы как лаборатории для проверки общей теории относительности. Один из них, PSR 1534+12, открытый в 1991 г. Александром Волшаном, может послужить для еще более точного определения скорости диссипации энергии за счет гравитационных волн, чем халс-тэйловский пульсар. Поскольку эти системы состоят из нейтронных звезд с сильными собственными гравитационными полями ( $GM/Rc^2 \cong 0,2$ ), на динамику систем начинает оказывать влияние нелинейность гравитации. Таким образом, вдобавок к проверке гравитационного излучения, двойные пульсары могут быть использованы для важных тестов теории сильных гравитационных полей, что является дополнением к динамическим



тестам в слабых гравитационных полях, следующим из экспериментов в Солнечной системе.

Джо Тэйлор и его коллеги продолжают изучать пульсары с помощью техники высокоточного слежения за временем прихода импульсов (так называемого тайминга пульсаров), используя улучшенную принимающую аппаратуру телескопа в Аресибо, современную временную поддержку от атомных часов, которая передается на телескоп через Глобальную позиционную систему, а также утонченные методы анализа данных наблюдений. Они изучают как двойные, так и одиночные пульсары (в особенности с периодом порядка нескольких миллисекунд) для проверки фундаментальных теорий гравитационной физики, а также для поиска гравитационного излучения от ранней Вселенной. В 1980 г. Джо Тэйлор переехал из Массачусетского университета в Принстон, где в настоящее время он занимает должность профессора физики им. Джеймса С. Мак-Доннелла. Рассел Халс после получения степени доктора философии и занятия нескольких пост-доковских позиций покинул радиоастрономию и перешел работать в область физики плазмы и в настоящее время работает над проблемами ядерного деления в Принстон-

ском университете. 10 декабря 1993 г. Халс и Тэйлор получили Нобелевскую премию по физике от короля Швеции за "открытие нового типа пульсаров — открытие, которое создало новые возможности в изучении гравитации".

### Благодарность

Автор заимствовал для этой статьи гл. 10 книги: К.М. Уилл "Был ли Эйнштейн прав? Проверая общую теорию относительности" (2-е изд., Нью-Йорк: Бэйсик Букс, 1993).

(Перевод с англ. К.А. Постнова)

### Список литературы (для дальнейшего чтения)

- Hulse R A, Taylor J H *Astrophys. J. Lett.* **195** L51 (1975)  
 Taylor J H, Fowler L A, McCulloch P M *Nature* **277** 437 (1979)  
 Taylor J H, Wolszczan A, Damour T, Weisberg J M *Nature* **355** 132 (1992)  
 Will C M *Theory and Experiment in Gravitational Physics*. Rev. ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1993)  
 Will C M *Was Einstein Right? Testing General Relativity Theory*. 2nd ed. (New York: Basic Books, 1993)

## Просим подписчиков прислать заполненный бланк в МП "ЦЕНТРЭКС"

✂ -----

Ф. И. О. ....  
 или  
 Организация .....  
 АДРЕС ДОСТАВКИ (с почтовым индексом) .....  
 .....  
 Тел. (дом.) ..... Тел. (служ.) .....  
 Факс ..... E-mail .....  
 Профессия .....  
 Место работы .....  
 Должность .....  
 Ученая степень ..... Звание .....  
 Область научных интересов .....  
 ..... (Пишите, пожалуйста, разборчиво!)

**ЛИСТ ПОДПИСЧИКА**  
 журнала "Успехи физических наук"  
 (Подписка на 1994 год)

Дата платежа .....  
 Название банка .....  
 (номер почтового отделения) .....  
 Номер кассового аппарата .....  
 Номер квитанции .....  
 С какого времени являетесь подписчиком журнала "УФН" .....  
 .....