

НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1993

Открытие двойного пульсара

Р.А. Халс

(Нобелевская лекция. Стокгольм, 8 декабря 1993 г.)

PACS numbers: 97.60.G

Ровно в этот день, 20 лет тому назад, 8 декабря 1973 г., находясь на обсерватории Аресибо в Пуэрто-Рико, я записывал в своем блокноте наблюдения, подтверждающие открытие первого пульсара, которые составляли основу моей кандидатской диссертации. Я уверен, что был в то время так взволнован, что не мог даже представить, какие события ожидают меня впереди и что они в конце концов приведут меня сюда.

Мне хотелось бы рассказать вам о научном приключении, об интенсивной подготовке, долгих часах ожидания, о внезапном открытии и до некоторой степени суматошных попытках найти смысл в полученных наблюдениях. Замечательным и неожиданным результатом этой детективной истории было открытие, вот уже 20 лет приносящее блестящие научные результаты. Профессор Тэйлор расскажет о нем в своей лекции. Я надеюсь, что, слушая эту историю, вам вместе со мной удастся вновь пережить тревоги и волнения этого приключения, и, как награда, — в конце останется некоторое личное представление о процессе научного открытия и о природе самой науки, как о попытке человеческого духа познать мир.

Пульсары

Пульсары были открыты в 1967 г. в Кембриджском университете Энтони Хьюишем и Джоселин Белл, и за эту работу в 1974 г. была присуждена Нобелевская премия. В то время они занимались изучением быстрых флуктуаций сигналов (известных также под названием сцинтилляций) от астрофизических радиоисточников. Они наверняка не думали, что обнаружат новый класс астрофизических объектов, так же как через несколько лет, когда мы начали наши исследования пульсаров в Аресибо, мы совсем не ожидали, что откроем астрофизическую лабораторию по проверке общей теории относительности. И, действительно, пульсары оказались замечательными объектами не в последнюю очередь и



Расселл А. Халс

потому, что были предметом двух интересных научных исследований, начавшихся неожиданно и закончившихся вручением Нобелевской премии.

Природа пульсаров вначале была предметом жарких споров. Теперь мы знаем, что на самом деле эти замечательные источники регулярно пульсирующего радиоизлучения представляют собой быстровращающиеся нейтронные звезды. На рис. 1 схематично изображен пульсар и принимаемая радиотелескопом последовательность импульсов от него.

Нейтронные звезды имеют примерно солнечную массу, но сжаты до размеров всего ~ 10 км. Так как радиус нашего Солнца около $7,0 \cdot 10^5$ км, то немедленно следует, что мы имеем дело с чрезвычайно плотными объектами. Сильное гравитационное поле нейтронной звезды достаточно, чтобы вдавить электроны в ядра обычных атомов, так что вещество становится состоящим главным образом из нейтронов. В некотором смысле нейтронная звезда представляет собой гигантское атомное ядро, удерживаемое не ядерными силами, а гравитацией.

Расселл А. Халс (Russell A. Hulse). Принстонский университет, Лаборатория плазменной физики, Принстон, шт. Нью Джерси, 08536, США

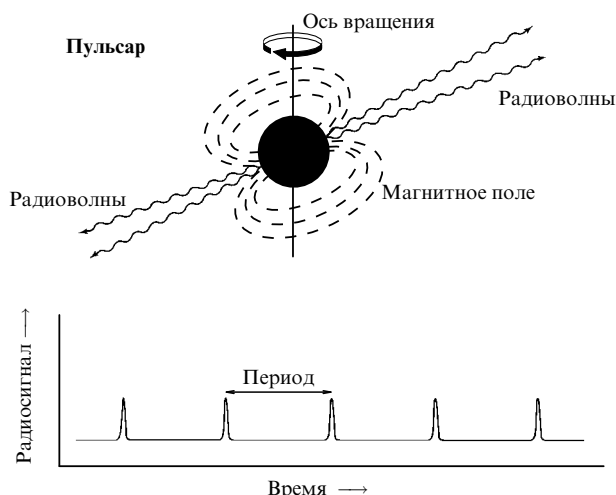


Рис. 1. Концептуальная схема пульсара, показывающая быстро вращающуюся нейтронную звезду, которая излучает узкий пучок радиоволн из полярных областей, откуда выходят силовые линии магнитного поля

Нейтронные звезды и, следовательно, пульсары, образуются при вспышках сверхновых на поздних стадиях эволюции звезд с массой во много раз большей массы Солнца. Когда ядерное горючее такой массивной звезды полностью исчерпывается, конечный коллапс звездного ядра приводит к образованию нейтронной звезды, что сопровождается колоссальным взрывом и сбросом оболочки.

Происхождение пульсаров при вспышках сверхновых объясняет, почему в 1973 г., когда я начал работать над своей диссертацией, было неудивительно, что все обнаруженные к тому времени пульсары были одиночными звездами, несмотря на известный факт, что значительная доля нормальных звезд входит в состав двойных и кратных систем. Казалось разумным ожидать, что огромная потеря массы звездой во время вспышки сверхновой приведет к разрыву орбиты двойной системы. Открытие первого двойного пульсара добавило новый штрих к этой устоявшейся картине в том смысле, что хотя разрыв весьма вероятен, он вовсе не обязателен.

Сохранение углового момента и магнитного поля при образовании нейтронной звезды во время коллапса ведет к появлению быстро вращающихся пульсаров с сильными магнитными полями порядка $B \sim 10^{12}$ Гс. На рис. 1 это поле схематически изображено в виде диполя, хотя на самом деле из наблюдений следует, что поле может иметь более тонкую структуру; мы вернемся к обсуждению этого факта чуть позже. Сочетание быстрого вращения пульсара с сильным магнитным полем приводит к возникновению очень узконаправленного пучка радиоволн, излучаемых из областей магнитных полюсов. Если один (или иногда два) из этих пучков при вращении попадает на луч зрения земного наблюдателя, то радиотелескоп регистрирует характерный короткий импульс. Этот эффект очень похож на действие маяка, когда медленно вращающийся узкий луч постоянного света воспринимается удаленным наблюдателем как регулярный мигающий источник излучения, видимый каждый раз, когда вращающийся пучок света попадает на его луч зрения.

Одновременная свертка нескольких сотен следующих один за другим с известным периодом индивидуальных

импульсов (как показано на рис. 1) позволяет получить средний профиль импульса с хорошим отношением сигнала к шуму. Такой усредненный (интегральный) профиль очень устойчив и его форма уникальна для каждого отдельного пульсара, как отпечатки пальцев уникальны для каждого человека. Формы импульсов очень разнообразны, от простой однопиковой до сложной многопиковой, что отражает особенности геометрии магнитного поля каждого индивидуального пульсара. Характерная ширина этих профилей мала по сравнению с периодом пульсара и у большинства пульсаров составляет около нескольких процентов от периода.

Именно этот средний импульс считается одной из фундаментальных характеристик при наблюдении пульсаров, о которых здесь пойдет речь. Впрочем, интересно отметить, что средняя форма импульса у данного пульсара не является инвариантной копией и почти никогда не наблюдается в индивидуальных импульсах, которые подвержены квазислучайным и регулярным изменениям. В этом смысле рис. 1 является упрощенной схемой, в которой все импульсы изображены одинаково. Эта стабильность средней формы импульсов в противоположность изменению формы от импульса к импульсу объяснима, если связывать средний импульс (т.е. форму пульсарного пучка) с фиксированной геометрией магнитного поля, а индивидуальными импульсами соотносить с локальными мелкомасштабными вариациями излучения плазмы, движущейся в этом магнитном поле.

Точные измерения собственного периода пульсаров, определяемого из анализа времен прихода индивидуальных импульсов, показывают, что сам он представляет собой чрезвычайно точные часы. Эта стабильность легко объясняется, как следствие высокого постоянства вращения чрезвычайно компактного объекта с массой $\sim 1M_{\odot}$. То, что пульсары представляют собой такие точно идущие часы, является в действительности ключевым обстоятельством в истории о двойном пульсаре. В своей лекции профессор Тэйлор более детально расскажет о методах временного слежения за пульсарами. Для меня достаточно упомянуть, что в настоящее время для PSR 1913+16 — объекта, на котором мы сфокусируем сегодня внимание, — точность измерения периода доходит до 14-й значащей цифры после запятой, что соперничает с точностью самых лучших атомных часов. Так что вы смело можете использовать пульсары для корректировки своих часов!

Поиски пульсаров

Когда ко мне в университете Массачусетса впервые подошел Джо Тэйлор, чтобы узнать, не интересно ли мне заняться поисками пульсаров для выполнения моей диссертации, я не заставил долго себя упрямить. Такое предложение сочетало интересную физику, радиоастрономию и компьютеры — прекрасную комбинацию предметов, которые я находил наиболее интересными.

К 1973 г. поиски пульсаров сами по себе не были какой-то новой задачей. После открытия пульсаров в 1967 г. было уже проведено много исследований и к моменту начала работы над моей диссертацией их было известно около 100. Однако телескопы и методы анализа, используемые в этих ранних исследованиях, довольно сильно изменились, и, хотя многие были весьма успешны, казалось, что в этой области еще есть простор для проведения

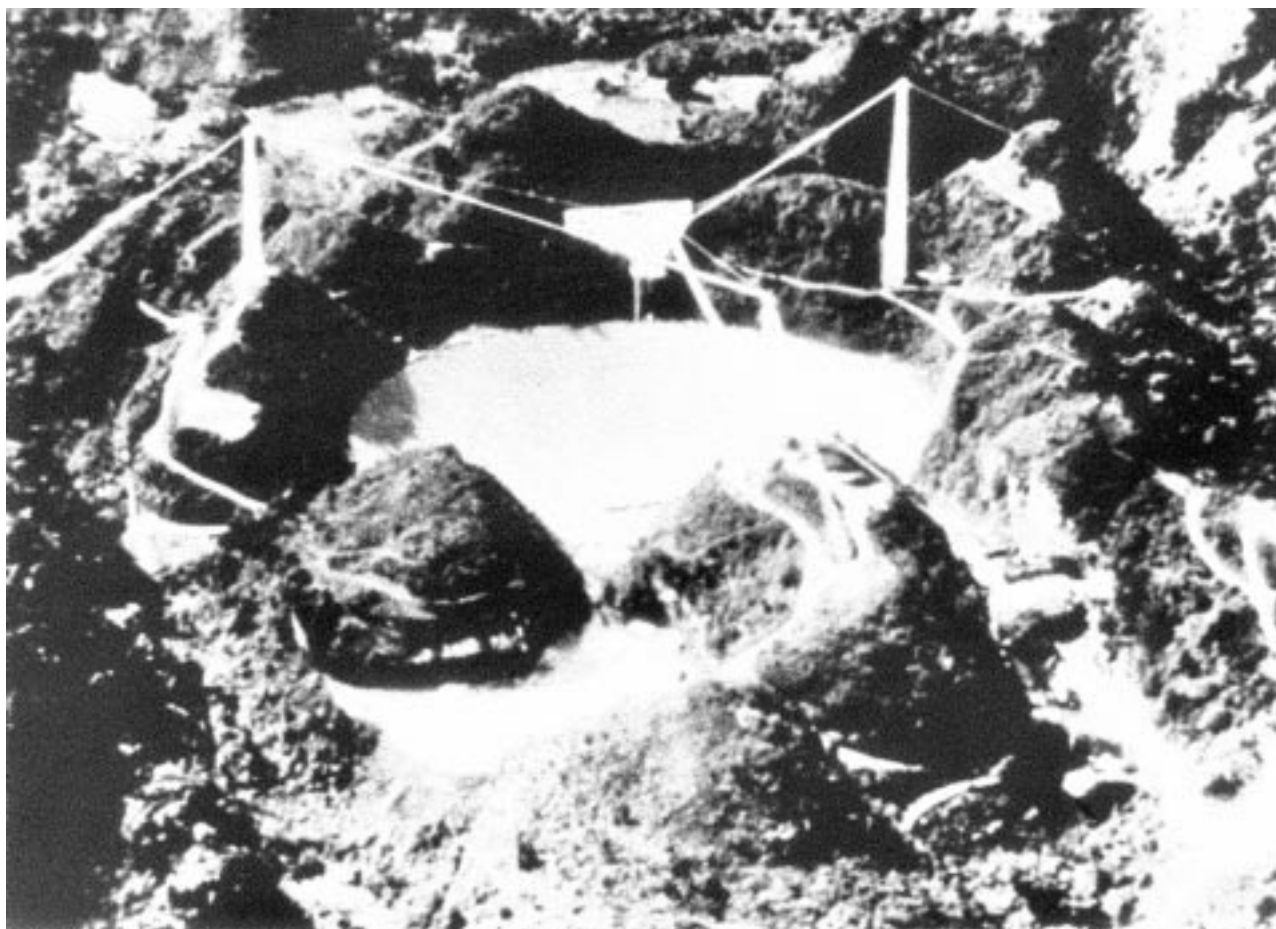


Рис. 2. Радиотелескоп в Аресибо с диаметром 1000 футов, управляемый Корнеллским университетом для Национального научного фонда (NSF) и входящий в Национальный Центр по астрономии и ионосфере (NAIC)

новых, высокочувствительных поисков пульсаров.

Для такого нового высокочувствительного поиска пульсаров было несколько причин. Во-первых, большое количество новых пульсаров пополнило бы статистику пульсарных периодов, производных периодов, характеристик импульсов, распределения пульсаров в Галактике и т.п. и позволило бы установить новые корреляции между этими свойствами. Далее, пульсарные сигналы замедляются при прохождении сквозь Галактику, рассеиваются и заметным образом изменяют свою поляризацию. По этим изменениям можно получить уникальную информацию о свойствах межзвездной среды в нашей Галактике. Так что обнаружение многочисленных новых пульсаров, особенно в удаленных частях Галактики, было бы желательно и для этих исследований. Кроме статистических исследований популяции пульсаров, эти поиски могли бы привести к открытию пульсаров с уникальными индивидуальными свойствами, такими как экстремально короткий период. И действительно, так как короткопериодические и очень далекие пульсары трудно обнаружить чисто по техническим причинам, эти наиболее интересные объекты были редки среди ранее открытых пульсаров. Мы увидели, что появилась возможность улучшить эту ситуацию с помощью продуманной, основанной на использовании компьютеров атаки на проблему пульсаров.

(И, конечно, запрос Джо денег у Национального научного фонда для приобретения компьютера включал,

помимо прочих мотиваций, такую фразу, что открытие "даже одного примера пульсара в двойной системе" было бы крайне ценно, так как "могло бы дать определение массы пульсара". Но мы не рассчитывали на такое открытие, и уж точно не могли предвидеть все вытекающие из него последствия!)

Телескоп в Аресибо

Пульсары представляют собой относительно слабые радиоисточники, которые должны наблюдаться с высоким временным разрешением, чтобы различить отдельные импульсы, поэтому для максимальной регистрации сигналов от них требуются большие радиотелескопы. У пульсаров наблюдаются также очень крутые радиоспектры, означающие, что они наиболее сильно излучают на низких радиочастотах и поэтому чаще всего их наблюдают в диапазоне частот от 100 до 1000 МГц, близком к телевизионному диапазону. Отсюда вытекало первое требование к новой амбициозной программе поиска пульсаров — использовать максимально доступный радиотелескоп для наблюдения на низких частотах. Ответ на это требование был прост: Аресибо.

При диаметре в 1000 футов радиотелескоп в Аресибо является крупнейшим одноэлементным радиотелескопом в мире. Вид с самолета на этот телескоп приведен на рис. 2. Для поддержания столь огромного зеркала телескоп был построен в естественной воронкообразной

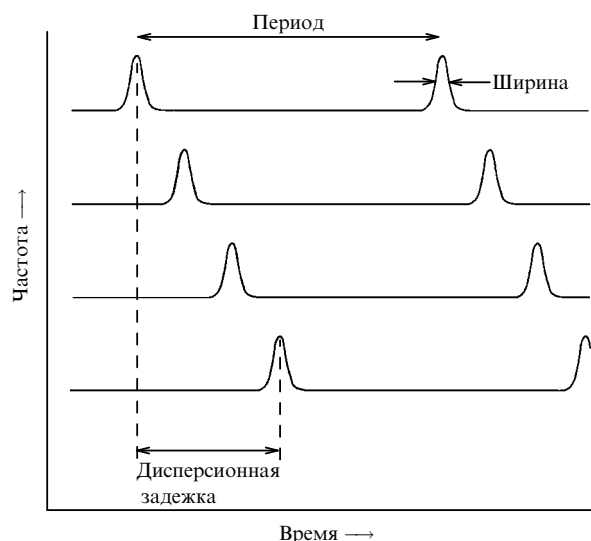


Рис. 3. Схематичное изображение сигнала, принимаемого от пульсара как функция частоты и времени, показывающее три параметра, используемые при анализе пульсарных обзоров: дисперсию, период пульсара и ширину импульса

долине в северо-западной части острова Пуэрто-Рико в нескольких милях от побережья, где расположен город с одноименным названием.

Несмотря на то, что фиксированное зеркало всегда направлено в зенит, телескоп в Аресибо может наблюдать объекты с зенитным расстоянием до 20 градусов из-за использования подвижных облучателей. Эти антенны укреплены на платформе, построенной из стальных стержней и подвешенной на кабелях на высоте 426 футов над поверхностью рефлектора. Вторичные антенны длиной 96 футов, работающие на частоте 430 МГц, и превосходные низкошумящие приемники как раз и обеспечивали условия, необходимые для проведения наших пульсарных исследований. Ограниченная возможность поворота антенн была приемлемой платой за получение чрезвычайно высокой чувствительности, хотя, как мы увидим ниже, эта ограниченность все же имела некоторые интересные последствия для открытия двойного пульсара.

Пространство параметров, конечная граница

Для того чтобы зарегистрировать любой сигнал с оптимальной чувствительностью, мы должны полностью охарактеризовать его свойства и затем сконструировать "фильтр сравнения", который бы наилучшим образом использовал эти известные свойства. С этой точки зрения такими тремя критическими параметрами пульсарного сигнала являются его дисперсия, период и ширина импульса, как показано на рис. 3. Дисперсия отражает тот факт, что при прохождении сигнала через пространство, заполненное свободными электронами, импульсы на более низкой частоте приходят с задержкой по отношению к импульсам на более высокой частоте. Мы уже говорили, что сам пульсар характеризуется периодом его импульсов, а форму импульсов принято описывать шириной среднего импульса.

Поскольку при поисковом обзоре неба периоды пульсаров, их мера дисперсии и ширина импульса заранее не известны, то, чтобы осуществить оптималь-

ную регистрацию, мы должны перепробовать широкий спектр значений этих трех параметров. Такой анализ сигналов также должен быть осуществлен в каждой точке неба. Добавляя две координаты положения источника на небе, в итоге мы получаем 5-мерное пространство параметров.

Таким образом, суть получения максимально возможной чувствительности при поиске новых пульсаров заключалась в способности эффективно проводить быструю и тщательную обработку получаемых радиотелескопом данных по каждому источнику, анализируя трехмерное пространство параметров (меру дисперсии, период и ширину импульса). В свою очередь это означало, что главная новая особенность этих поисков пульсаров по сравнению с тем, что делалось до сих пор, состояла в использовании компьютерного анализа, а не в улучшении телескопа и другого оборудования.

Дедисперсия

Радиосигналы от пульсаров подвергаются дисперсии при прохождении к Земле сквозь заполненное свободными электронами межзвездное пространство. Из-за этого эффекта к наблюдателю сначала доходят импульсы на более высоких радиочастотах, а затем — на более низких, как показано на рис. 3. Величина этого эффекта пропорциональна количеству электронов на луче зрения между пульсаром и Землей. Эта колонковая плотность называется мерой дисперсии (DM) и измеряется в единицах $\text{см}^{-3}\text{пк}$.

Из-за дисперсии при наблюдениях пульсаров возникает специфическая проблема. Обычно при наблюдении радиоисточников мы стараемся использовать широкополосные приемники, чтобы улучшить чувствительность наблюдений. На частотах, обычно используемых при наблюдении пульсаров, величина эффекта дисперсии такова, что импульсы приходят со значительной задержкой даже внутри типичной полосы в несколько мегагерц. Следовательно, без специальной обработки каждый регистрируемый импульс был бы размыт во времени. Например, при наблюдении на 430 МГц в Аресибо дифференциальная временная задержка для используемой 8 МГц-полосы для далекого пульсара с мерой дисперсии $DM \sim 200 \text{ см}^{-3}\text{пк}$ была бы 170 мс. Поскольку эта дисперсия в полосе приемника намного больше типичной ширины импульса пульсара или даже покрывает весь период у короткопериодических пульсаров, "дедисперсия" обычно является неотъемлемой частью пульсарных наблюдений. Она достигается тем, что сначала используется многоканальный приемник, разбивающий полную широкую полосу на более узкие индивидуальные соседние каналы таким образом, что дисперсионное размытие внутри каждого канала становится приемлемым для исследуемого пульсара. Затем последовательно более долгие временные задержки добавляются в поток данных от каждого высокочастотного канала, чтобы восстановить истинные временные соотношения между импульсами до того, как просуммировать все каналы.

Хотя процедура дедисперсии сама по себе достаточно проста и понятна, когда наблюдается известный пульсар с известной мерой дисперсии, при поиске новых пульсаров одновременно получается много потоков данных, которые должны подвергаться дедисперсии для всех

возможных значений меры дисперсии. Это требует, чтобы входные потоки данных от многоканального приемника суммировались не с одним набором временных задержек для соседних каналов, а с целым диапазоном наборов временных задержек. Для максимальной эффективности такого суммирования входных данных использовался алгоритм, называемый TREE (англ. "дерево") по аналогии с используемой вычислительной структурой, который отбрасывал лишние вычисления для различных наборов временных задержек.

Эта дедисперсионная обработка представляет собой первый шаг в анализе наблюдений пульсаров (рис. 4). При наблюдениях на телескопе в Аресибо на частоте 430 МГц полоса многоканального приемника шириной 8 МГц разбивалась на 32 250 кГц-канала. Затем зарегистрированные в каждом из этих каналов сигналы суммировались, подвергались де-дисперсии и записывались на магнитную ленту с помощью программы ZBTREE, выполняемой на миникомпьютере Modcomp II/25 в реальном времени при сканировании телескопом неба.

Интересно отметить, что алгоритм TREE может самостоятельно использоваться при поиске пульсаров путем простого сканирования получающихся потоков данных на предмет поиска характерно диспергированных импульсов от какого-нибудь пульсара. Критерием обнаружения служит избыток сильных импульсов или рост мощности флуктуирующей компоненты слабого сигнала при некоторой ненулевой мере дисперсии. Такой подход, основанный целиком на дисперсионных свойствах пульсарного сигнала, гораздо менее чувствителен, чем описываемый здесь поиск, который использует полный частотный анализ данных. Однако в действительности именно такой упрощенный алгоритм первоначально предусматривался для обработки наблюдений на Аресибо, и Джо Тэйлор просил финансовой поддержки у Национального научного фонда для приобретения компьютера, осуществляющего именно эту процедуру. И, как только этот новый миникомпьютер появился, стало ясно, что его вычислительной мощности хватит для проведения полной де-дисперсии и анализа данных на периодичность. Решение попытаться осуществить эту гораздо более амбициозную задачу было решающим фактором в конечном успехе поиска пульсаров на телескопе Аресибо.

Следующая часть поиска диспергированного пульсарного сигнала осуществлялась программой REPAC. Этот промежуточный шаг обработки производился на компьютере CDC 3300 Обсерватории Аресибо и был нужен потому, что у компьютера Modcomp не было дискового устройства, и, следовательно, было недостаточно памяти для реорганизации данных ZBTREE в блоки длительностью 136,5 с, которые использовались для анализа на периодичность. REPAC строила гистограммы распределений величины сигнала в каждом канале дедиспергированных данных для того, чтобы оставить возможность обнаружения необычно флуктуирующих пульсаров или объектов другого типа, от которых могли бы регистрироваться спорадические непериодические импульсы. На практике ничего такого обнаружено не было, хотя все же эти гистограммы оказались полезными для слежения за процедурой де-дисперсии и индикации грубых земных помех (как вызванных деятельностью человека, так и естественной природы — типа грозы).

Анализ данных пульсарных поисков

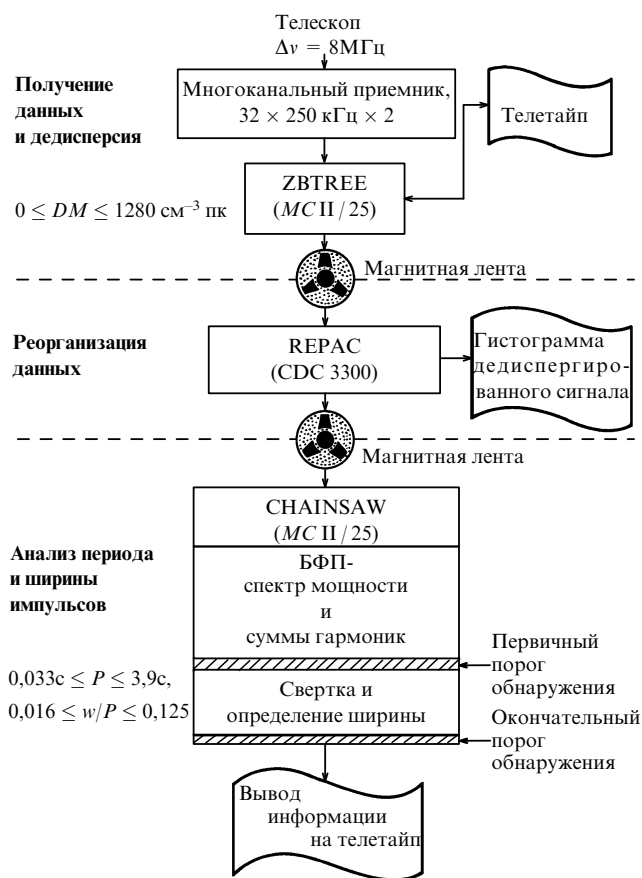


Рис. 4. Блок-схема полного анализа данных пульсарного обзора

Анализ периода и ширины импульса

Вновь обращаясь к рис. 4, мы видим, что для окончательного анализа на периодичность и определение ширины импульса магнитная лента с результатами работы программы REPAC считывалась миникомпьютером Modcomp II/25 в промежутках между наблюдениями с помощью программы, называемой CHAINSAP (англ. "цепная пила", так как она обрабатывала результаты программы TREE (англ. "дерево") — я думаю, Джо Тэйлор заслуживает благодарности за ввод в обращение этих названий).

Этот анализ на периодичность по времени вычислений намного превосходил остальные процедуры, поэтому было затрачено много усилий на то, чтобы его алгоритм был достаточно эффективным и удовлетворял, с одной стороны, временным ограничениям задачи, а с другой не уменьшал окончательную чувствительность.

В конечном счете, был выбран гибридный алгоритм для поиска периода и определения ширины импульса, который совмещал фурье-анализ и свертку данных. На стадии фурье-анализа для получения спектра мощности от каждого интегрального набора данных использовалось быстрое преобразование Фурье (БПФ). Следующая проблема состояла в том, что частотный спектр от периодической последовательности узких сигналов (как в случае пульсаров) распределен по многим гармоникам фундаментальной частоты пульсара, причем их число обратно пропорционально ширине импульса.

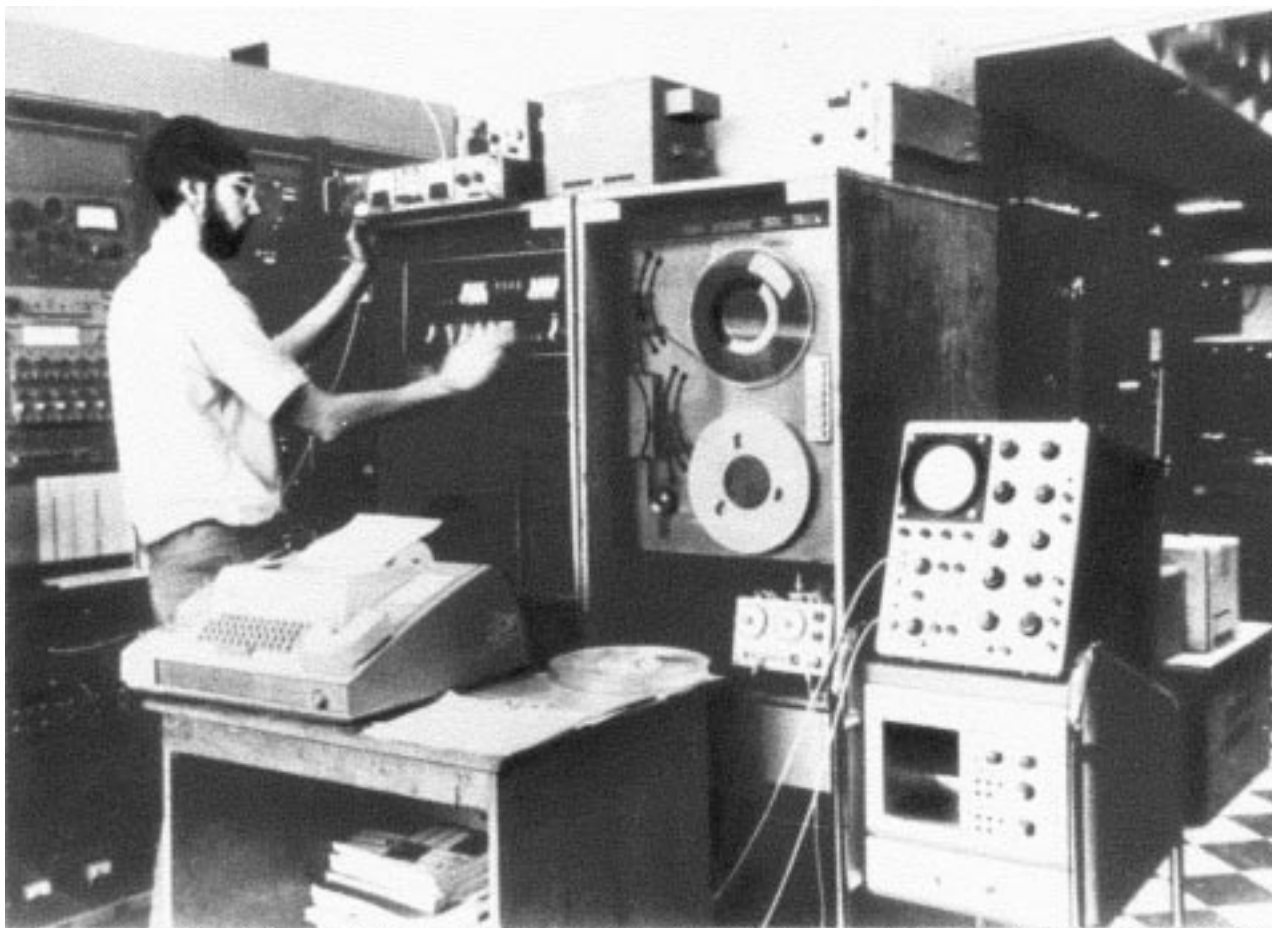


Рис. 5. Мое фото на фоне миникомпьютера Modcomp II/25, используемого при поисках пульсаров на Аресибо, сделанное в контрольной комнате Аресибо вскоре после открытия двойного пульсара

Гармоники складывались в пределах полученного спектра мощности, причем для того, чтобы покрыть желаемый интервал периодов и ширин импульсов, считались отдельные суммы для разного возможного числа гармоник для каждого значения фундаментальной частоты.

На второй фазе анализа по суммам гармоник в пределах спектра мощности определялись наиболее сильные сигналы. Это эффективно формировало первый порог детектирования, который служил для отсеивания от дальнейшего рассмотрения большей части пробных значений периодов и ширин импульсов для каждого из тех наборов данных, в которых, как казалось, не было ничего похожего на пульсарный сигнал. Периоды, найденные у каждого из самых "подозрительных" значений пробной меры дисперсии, затем использовались для проведения полной свертки данных и нахождения наиболее подходящей ширины импульса, причем отдельно в каждом случае вычислялось свое отношение сигнала к шуму. Если это отношение превосходило установленный окончательный порог, данные распечатывались на телетайпе как возможное открытие пульсара. Как правило, за конечные пороговые значения отношения сигнала к шуму бралась величина 7σ (т.е. 7 стандартных отклонений отношения сигнал/шум), что могло показаться чрезмерно большим. Однако такой высокий порог был необходим для того, чтобы число ложных регистраций было как можно меньше при анализе столь многомерного пространства параметров.

Сведение воедино

В конце концов компьютеризованная система поиска, показанная на рис. 4, совместно с возможностями телескопа Аресибо позволила достичь чувствительности обнаружения пульсара в десять раз лучшей, чем в любом из предыдущих поисков [1]. В каждой точке неба, сканируемой телескопом, поисковый алгоритм перебирал свыше 500 000 комбинаций дисперсии, периода и ширины импульса в пределах $0 < DM < 1280$ пк см⁻³, $0,033 < P < 3,9$ с и $0,016 < w/P < 0,125$.

Описав, как выглядела процедура поиска пульсаров на бумаге, позвольте мне показать вам, как это было на практике на реальном компьютере на телескопе Аресибо. На рис. 5 приведена фотография — за компьютером Modcomp в контрольной комнате телескопа Аресибо. Признаюсь, что глядя на это фото, я все же чувствую себя несколько постаревшим. Такая реакция вызвана не столько тем, что на картинке я созерцаю себя, а скорее тем, что я смотрю на этот компьютер, о котором, как я все еще помню, я думал тогда, как об очень мощной машине. Хотя он, конечно, был очень мощным для нашей задачи в то время, компьютерная технология проделала большой путь с тех пор, как я работал в Аресибо.

Как вы, вероятно, заметили, компьютер был заключен в два довольно грубых деревянных ящика. Я сделал их из фанеры еще будучи в Массачусеттском университете, чтобы одновременно использовать их как упаковочную тару для компьютера и оборудования при

перевозке его в Аресибо. Это иллюстрирует диапазон навыков, часто необходимых студентам при выполнении их дипломной работы. Вы, возможно, заметили и тонкие метки вверху на боку ящика, которыми отмечался текущий счет вновь открытых пульсаров.

Сам компьютер имел память 16 К для 16-битных слов. Операции с плавающей точкой не были предусмотрены, так как все вычисления делались в целочисленном представлении для большей скорости. Для интерактивного ввода—вывода использовался телетайп, а магнитофон обеспечивал необходимое хранение массивов данных и связь с другими компьютерами.

Чего не видно на этой картинке, так это того, что компьютер был целиком запрограммирован на языке Ассемблера. Программа состояла из более чем 4000 операторов, записанных на перфокартах. К тому же из-за ограничения компьютерного устройства (16 К памяти, нет диска) я не мог полностью использовать операционную систему, поставленную изготовителем, которая, впрочем, все равно оказалась бы слишком громоздкой и медленной для целей нашего исследования. Следовательно, в мою задачу как программиста этого компьютера входило написание своих собственных драйверов для периферийных устройств, обслуживание прерываний и тому подобное. Я все же вспоминаю, как испытывал известное чувство гордости за то, что каждый набор битов и каждое действие, выполняемое этой машиной, явно контролировалось мною написанной программой. Я также вспоминаю, что когда все это было сделано, я сказал, что хотя понять и широко программировать компьютер на столь фундаментальном уровне было очень ценным и интересным опытом, одного раза в жизни для такого опыта было вполне достаточно!

Сканирование неба с телескопом и компьютером

Так случилось, что в то время, когда мы предложили использовать телескоп Аресибо для наших исследований, он находился в стадии большой реконструкции. К счастью, несмотря на то, что большинство других типов наблюдений были невозможны из-за этих работ, задача поиска новых пульсаров в это время была не сильно ограничена урезанными техническими возможностями. К тому же, так как наблюдательное время должно было вклиниваться в график между техническими работами, студент, который мог проводить долгое время рядом с телескопом, мог пользоваться преимуществом в использовании возникающего по разным непредвиденным причинам времени для проведения своих наблюдений. Из-за этого мы имели возможность проводить поиски пульсаров в течение гораздо большего количества часов, чем изначально могли предположить. Я вспоминаю, как однажды кто-то спросил, как долго еще я бы мог задержаться в Аресибо, на что Джо Тэйлор шутливо ответил: "Ровно на один месяц больше, чем в прошлом году". В действительности, я с перерывами находился в обсерватории, проводя наблюдения пульсаров, с декабря 1973-го по январь 1975 г., периодически уезжая обратно в Массачусетс, когда не было наблюдательного времени.

Конечно, мои долгие дни в Аресибо обогатили мой опыт в разных отношениях. Некоторые из них теперь кажутся забавными, а тогда таковыми вовсе не казались, например, это такие моменты, когда ломалось оборудо-

вание или радиопомехи портили целые наблюдательные сеансы и тому подобное.

Борьба с помехами является главным делом, которым занимаются астрономы — наблюдатели пульсаров, поскольку на относительно низких частотах, используемых при этих наблюдениях, существует много разного рода помех. Например, я припоминаю, как пытался отстроиться от одного долгопериодического "пульсара", который в конце концов оказался связанным с мигающим предупреждающим фонарем, установленном на одной из стоек, поддерживающих платформу над телескопом. Из-за гроз часто пропадали даже целые сеансы наблюдений, а когда военно-морским силам США вздумалось провести учения недалеко от побережья, не было смысла даже попытаться начать наблюдения — я просто сидел в контрольной комнате и созерцал сигналы от морских радаров или чего-то там еще, которые вспыхивали на спектральном анализаторе обсерватории.

Как я уже упомянул раньше, успешная работа над дипломом часто требует от студента таких навыков, которые никак не предусматривались начальной постановкой задачи. В моем случае это включало в себя необходимость стать инженером-любителем по обслуживанию компьютеров, когда в самые неподходящие моменты выходили из строя такие компоненты миникомпьютера, как блок питания, контроллер магнитофона, аналого-цифровой преобразователь или мультиплексор.

Да и просто само по себе использование телескопа Аресибо было совершенно незабываемым личным опытом. Мне особенно нравилось, что я могу сам контролировать работу телескопа во время наблюдений, следя через окно контрольной комнаты, как гигантская конструкция облучателя начинала двигаться по моей команде начала наблюдений. Это создавало чувство прямой причастности процессу наблюдений, я как бы смотрел в небо во много раз увеличенным глазом. На некоторых телескопах контрольные комнаты расположены так, что вы не можете даже видеть сам телескоп во время наблюдений. Хотя это едва ли создает практические проблемы для наблюдений, но все же несколько более романтично (и к тому же успокаивает сознание астронома, что все идет хорошо) видеть, как телескоп движется в процессе наблюдений!

В итоге система поиска пульсаров работала превосходно. К концу программы было открыто 40 новых пульсаров [2] на 140 квадратных градусах неба, просканированных в ходе первичного поиска вблизи прямого восхождения 19^h в той части плоскости нашей Галактики, которая была доступна для наблюдений с помощью телескопа Аресибо. Из этих 40 новых пульсаров 10 были уже известны ранее, так что счет в пользу вновь открытых пульсаров в этой области неба был 4 : 1. Хотя для меня это было бы вполне удовлетворительное достижение и создавало прекрасную основу моей диссертации, все это померкло по сравнению с открытием пульсара PSR 1913 + 16, намного более замечательного остальных сорока.

Осмысление данных: двойной пульсар

К июлю 1974 г. поиски пульсаров стали совершенно рутинным занятием. К тому времени я даже распечатал специальные "формуляры" для каталогизации и описа-

734 736
473/735-736/19H13:114S/16DM0S/15//3/53! 3799/7.25
15/ 5/

58.982 304 58

473/735-736/19H13:114S/16DM0S/15//10/53. 3799/7.25
15/ 5/

832 864 896 928 960 992 1024 1056 1088 1120
1132 1164 1196 1228 1260 1292 1324 1356 1388 1420

Рис. 6. Телетайпная выдача программы анализа данных, показывающая открытие PSR 1913+16 по данным наблюдений от 2 июля 1974 г. Обратите внимание, что из-за смещения времени накопления данных во избежание интерференции с частотой 60 Гц питающей электросети, период пульсара 53 мс должен быть скорректирован к правильной величине 59 мс, который я в то время записал вручную на выдаче

PSR 1913+16*				
RA	DEC	PERIOD	DM	
19:13:14	16°00'	059.0332	150	
19 13 13	16°00'24"	059.0332	167±15	
±4 ^s	±60"	059.0332	1059030	
SCAN	DUMPS	DM CHNL	FREQ/tree	S/N
473	705-736	8,10	430/2B	7.25
526	1-128	8,9	430/2B	13.0
535	1-384	8	430/2B	15.0
b = 49.95 b = 2.11 fantastic!				

Рис. 7. "Анкета открытия" из моей тетради с записью регистрации и подтверждения PSR 1913+16

ния открытия, подтверждения и последующего улучшения периода каждого нового пульсара. На рис. 6 приведена распечатка выдачи телетайпа, говорящая об открытии нового пульсара 2 июля 1974 г. Выходные данные всей поисковой системы представляют собой сжатое резюме важнейшей информации, включая координаты пульсара. Положение этого нового пульсара соответствует положению пульсара PSR 1913+16, который сейчас известен как двойной пульсар. В этом случае были получены две выдачи, свидетельствующие о присутствии сигнала с одним и тем же периодом в двух дисперсионных каналах 8 и 10. На этой выдаче период пульсара напечатан равным около 53 мс, но моей рукой он исправлен на правильное значение 59 мс. Стандартный корректирующий множитель 1,1112 к первичной поисковой выдаче исправлял сдвиг в системном интервале накопления с 15 мс на 16,668 мс, введенный для

избежания интерференции с частотой 60 Гц питающей электросети.

Особенно замечательно число 7,25 справа от строки выдачи, так как оно показывает, что изначальная регистрация сигнала от двойного пульсара была на уровне $7,25\sigma$. Поскольку окончательный порог регистрации был установлен в $7,0\sigma$ для этого, как и для большинства других наблюдений, то ясно, что будь пульсарный сигнал чуть слабее в этот день, он бы никогда не был бы пропущен компьютером. Двойной пульсар действительно "шепнул" о себе! Оглядываясь назад, можно сказать, что вся работа, направленная на вытягивание предельно возможной чувствительности из алгоритма поиска пульсаров, действительно стоила таких усилий.

Формуляр вновь открытого пульсара PSR 1913+16 из моего журнала наблюдений показан на рис. 7. Он

PERIOD RETINEMENT FOR PSR 1913+16*

DATE 8/25/74

RA 19 13 14 DEC 16 00'

CDC INTERFACE SAMPLES EVERY 5 MSEC FROM 10 MSEC TREE, CHNL 14

SCAN	AST START	# RECORDS	2209 PERIOD	2209 ZEROLAG	DOPPLER
567	20 46 30	180	.059 028 056	.0176	.999 950 152
574	22 11 10	180	.059 000 696	.0539	.999 949 530

FWHM ~ 15 msec (badly smeared - 2209 has ~~some~~ problems)

check agreement between 567 and 574: $dp \sim \frac{(-.015)(1.06)}{900} \sim .000001$

$P_{567} = .059 025 113 5$

$P_{574} = .058 997 718 2$

2209 .000 027 - so obviously 2209 is not able to get a good period due to same wave nature of pulse

$dp \sim \frac{(-.000027)(\frac{1.06}{8560})}{.059} \sim 2.4$ so extrapolation not possible

Рис. 8. "Анкета уточнения периода" из моей тетради, показывающая неудачу моей первой попытки получить улучшенное значение периода PSR 1913+16

фиксирует первоначальную регистрацию на уровне $7,25\sigma$ на скане 473 вместе с последующими подтверждающими наблюдениями в сканах 526 и 535, которые привели к гораздо более уверенному отношению сигнала к шуму. Комментарий "фантастика" внизу относится к 59 мс периоду этого пульсара, из-за которого этот пульсар в то время был вторым по скорости вращения после знаменитого 33мс-пульсара в Крабовидной туманности. К тому моменту я не представлял, что ожидает этот пульсар впереди. Однако намек на дальнейшие события очевиден уже из этой таблицы. Вы можете заметить, как при последующих наблюдениях я возвращался к этой первичной таблице, изменяя значение в столбце периода, и в конце концов в разочаровании зачеркнул их все.

После того, как в ходе обзора открывалась группа новых пульсаров, специальное наблюдательное время отводилось для получения более аккуратного значения периодов этих пульсаров. Первая попытка уточнения периода PSR 1913+16 была предпринята 26 августа 1974 г., спустя примерно два месяца после первоначального открытия. Стандартная процедура состояла из

проведения двух отдельных 5–15-минутных сеансов наблюдений каждого пульсара — одного вблизи начала и второго вблизи конца примерно двухчасового наблюдательного окна, во время которого конкретный объект был ежедневно доступен для наблюдений с телескопом Аресибо. Затем данные сворачивались отдельно для каждого независимого наблюдения и времена прихода импульсов приводились к абсолютным моментам времени. Определенные в каждом из этих наблюдений периоды после вычитания доплеровского сдвига из-за движения Земли оказывались достаточно точными, чтобы затем связать фазы импульсов в обоих наблюдениях, используя времена прихода отдельных импульсов и таким образом давая еще более аккуратное определение периода на базе одно- или двухчасового промежутка времени.

Как можно видеть из рис. 8, моя первая попытка провести тогда эту стандартную процедуру привела к полностью непонятному результату. Обычно, прежде чем переходить к остальным вычислениям, я всегда сравнивал периоды, найденные в каждом из этих двух различных коротких наблюдений, просто для двойной

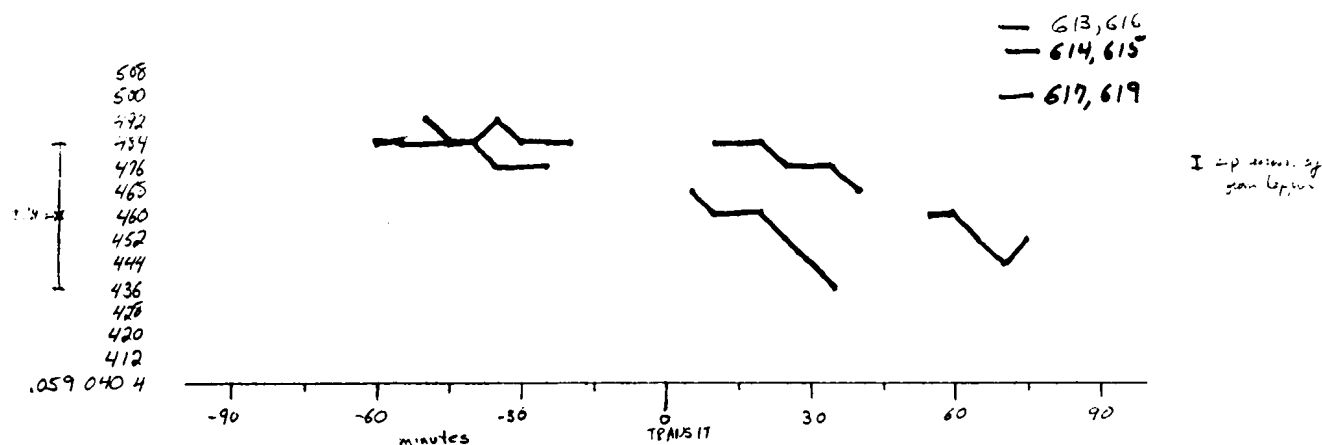


Рис. 9. Первые два наблюдения PSR 1913 + 16 с использованием улучшенной системы, специально разработанной для преодоления трудностей в определении пульсационного периода для этого пульсара. Наблюдаемый период пульсаций, определенный в последовательных 5-минутных интервалах накопления, отложен в зависимости от времени до и после прохождения через середину диаграммы направленности радиотелескопа. Справа можно видеть вычисления оценки величины изменения доплеровского сдвига из-за движения Земли. Глядя на этот график результатов 1 и 2 сентября, я понял, что сдвигом второй из этих кривых на 45 минут можно добиться совмещения обеих кривых. Это был ключевой момент в расшифровке двойной природы PSR 1913 + 16

проверки, что ничего не упущено. Как видно из моих записей, на самом деле в этих данных было какое-то упущение и весьма серьезное! Вместо того, чтобы после доплеровской коррекции получить периоды, одинаковые с точностью до некоторой малой ожидаемой экспериментальной ошибки, я получил различающиеся на 27 микросекунд значения — огромное расхождение. Естественно, моей реакцией не был возглас: "Эврика, это открытие", а скорее раздраженное: "Ну-ну, теперь-то что не так?" После того, как вторая попытка провести те же наблюдения через два дня привела к еще большему расхождению, я решил, что докопаюсь до истинной причины этой загадки, чем бы она ни была, и в конце концов получу хорошее значение периода для этого непослушного пульсара.

Хотя я и вправду не мог вообразить, что за специфическая проблема, инструментальная или возникшая в процессе обработки, могла давать такую ошибку, факт состоял в том, что при периоде 59 мс PSR 1913 + 16 был самым быстрым пульсаром, который я наблюдал! Поэтому его импульсы были видны с не очень хорошим разрешением при используемом мною 10 мс времени накопления, так что я подумал, что, может быть, это имеет отношение к делу. Трудность получить более высокое временное разрешение состояла в том, что для наблюдений по уточнению периода я частично использовал алгоритм ZBTREE для проведения де-дисперсии, а компьютер просто не мог выполнять ZBTREE быстрее, чем за 10 мс, которые я уже использовал. Так что увеличение временного разрешения означало постановку специальных наблюдений для одного этого пульсара и написание специальной программы для компьютера CDC 3300 телескопа Аресибо для де-дисперсии новых данных и форматирования их для анализа.

С помощью новой наблюдательной системы данные были впервые получены 1 и 2 сентября, спустя примерно неделю после того, как стала очевидной проблема определения периода. Так как я работал с новой системой, я пытался убедить себя, что, коль скоро стало доступно новое более высокое временное

разрешение, проблема исчезнет сама собой. Новые данные, конечно же, привели к прямо противоположному результату — теперь проблема стала еще тяжелее, так как период по-прежнему изменялся, но теперь уже нельзя было валить вину на плохое временное разрешение. Рис. 9 показывает график из моей тетради, на котором отложены данные, полученные и обработанные новой системой. PSR 1913 + 16 в каждом этих двух дней наблюдался по возможности долго, и наблюдаемый период пульсара отложен в зависимости от времени на протяжении примерно 2 часов каждый день, когда пульсар был виден телескопом. В своей тетрадке я изобразил данные разных дат разным цветом, а на этом рисунке это плохо видно. Данные первого дня образуют ломаную верхнюю линию, а второго дня — нижнюю ломаную. Разрывы в линиях были следствием неизбежных пробелов в данных. Обе кривые ведут себя аналогично: сначала период большой, а затем постепенно уменьшается. Величина изменения доплеровского сдвига из-за земного движения за это время показана в виде маленькой ошибки справа от кривой, так что даже если эта поправка делалась совершенно неправильно, она не могла привести к различиям, которые я здесь видел. Такой постоянный дрейф во время наблюдений или эксперимента обычно очень подозрителен и указывает на инструментальную проблему, но к тому времени у меня не осталось никакой разумной идеи, что могло бы давать подобный эффект. Разумеется, точные стандарты времени обсерватории Аресибо не могли подозреваться в таком отставании! Но потом, глядя на этот график, мне внезапно пришло в голову, что эти две кривые, хотя и показывали одну и ту же убывающую тенденцию, были все же не совсем идентичны и на самом деле совпали бы, если их сместить на 45 минут относительно друг друга. Хотя я точно помню этот момент как критический для осознания реальности вариаций периода, я не могу вспомнить, было ли мне тогда ясно, что вся картина связана с двойственностью PSR 1913 + 16. Но, конечно, через короткое время я был уверен, что наблюдаемые мной изменения периода на самом деле

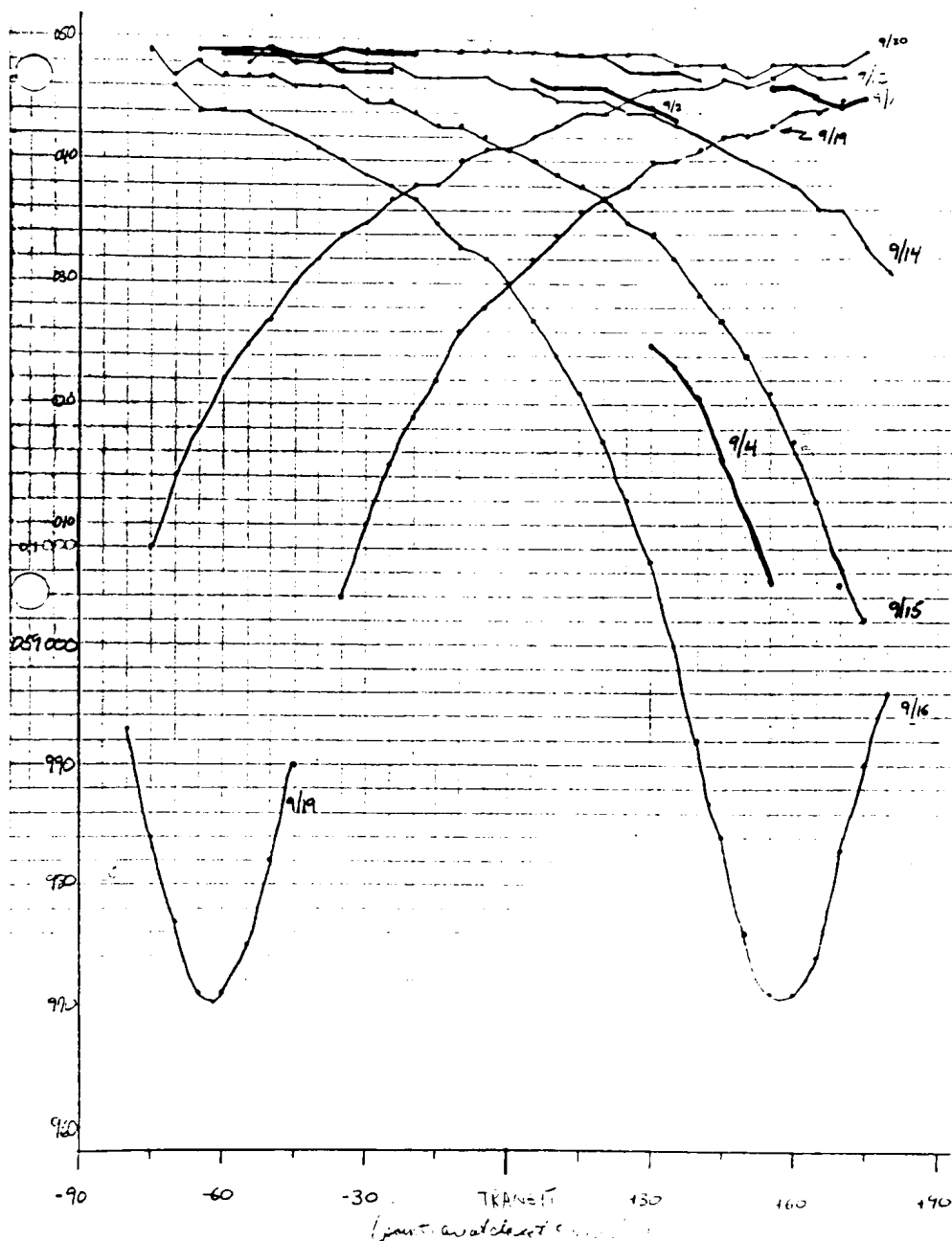


Рис. 10. После того, как я понял, что PSR 1913 + 16, вероятно, двойная система, наблюдения в последующие дни проводились с максимально возможной частотой, чтобы полностью подтвердить эту гипотезу. Критерий, который я установил для себя, состоял в том, что мне надо было увидеть, как производная периода изменяет знак и начинает возрастать. Это окончательное подтверждение гипотезы двойственности было получено в данных от 16 сентября, показанных внизу справа

связаны с доплеровскими вариациями периода пульсара из-за его орбитальной скорости вокруг какой-то звезды-компаньона.

Я немедленно изменил мое расписание наблюдений таким образом, чтобы получить как можно больше данных о пульсаре PSR 1913 + 16 за как можно более короткое время. Но все еще некоторое опасение оставалось; это было совершенно новое замечательное открытие, и я хотел быть абсолютно уверенным в своих выводах, прежде чем огласить мои результаты. Тогда я установил для себя строгий критерий. Если пульсар действительно находился в двойной системе, в некоторой точке его период должен прекратить свое постоянное уменьшение в течение ежедневных наблюдений, достиг-

нуть минимума и начать вновь возрастать. Я решил ждать подтверждения этого предсказания, чтобы освободиться от всяких сомнений, что я правильно понимаю то, что я вижу.

Мне пришлось ждать около двух недель, прежде чем я смог получить окончательное подтверждение, в котором я нуждался. Следующая страница из моей тетради приведена на рис. 10 и показывает новые данные, собранные за это время. Как и прежде, наблюдаемый период пульсара отложен в зависимости от времени в течение сеанса наблюдений, причем данные первых двух дней наблюдений 1 и 2 сентября скопированы вверху страницы. Внизу справа видна кривая от 16 сентября, которая окончательно подтверждает то, что я надеялся

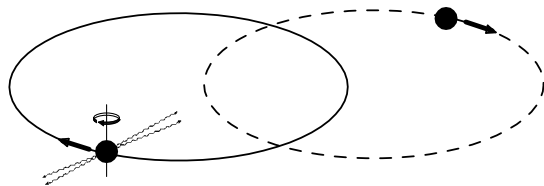


Рис. 11. Схема пульсара на эллиптической орбите вокруг столь же массивной звезды-компаньона

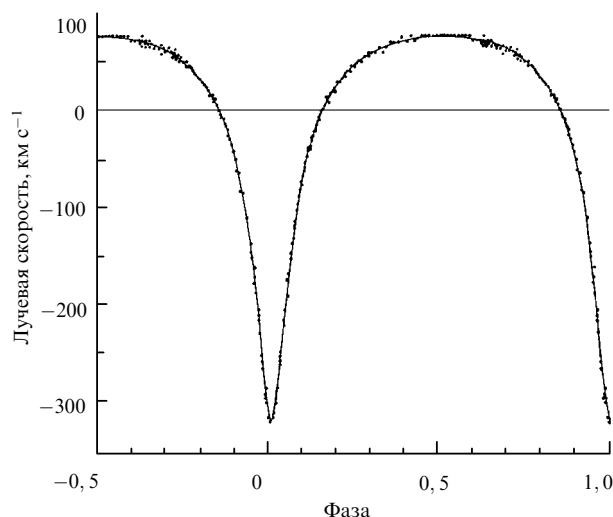


Рис. 12. Полная кривая лучевых скоростей для PSR 1913 + 16, взятая из первой статьи об открытии пульсара, подогнанная решением для кеплеровской орбиты. Орбитальная фаза есть доля орбитального периода в 7 ч 45 мин (из [3])

увидеть — как период достигает четкого минимума и затем начинает возрастать.

К 18 сентября мой анализ данных от 16 сентября, показывающих минимум периода, был завершен, и я написал письмо Джо в Армхёрст, чтобы сообщить ему о любопытной новости, что пульсар находится на высокоскоростной орбите в двойной системе с 8-часовым периодом. (Даже в этот момент я обращался к нему "Джо", а не "профессор Тэйлор" — неформальность, отражающая его обращение со своими студентами, как с коллегами, а не как с подчиненными, что я высоко ценил.) Но простая отсылка письма показалась мне довольно неадекватной такой новости, а поскольку телефонная связь из Аресибо была до некоторой степени проблематичной, я решил попытаться позвонить ему, используя коротковолновую радиосвязь между обсерваторией и Корнеллским университетом. Этот радиопередатчик связывался с Итакой, штат Нью-Йорк, где секретарь затем мог подключить радиосвязь к телефонной сети и соединить меня с Массачусетским университетом в Армхёрсте. Я не помню точно, о чем мы говорили после того, как я сообщил ему эту новость, но как вы можете вообразить, Джо весьма скоро оказался на самолете, летящем в Аресибо. Он прибыл в Аресибо с новым оборудованием для проведения де-дисперсии, которое позволяло проводить непрерывные наблюдения этой двойной системы гораздо более эффективно, чем это было возможно при использовании *ad hoc* системы, используемой мной при первых наблюдениях.

По его приезду мы обменялись своими соображениями о статусе и потенциальной значимости открытия

двойного пульсара и установили новое оборудование. Вскоре Джо начал программировать более аккуратную подгонку орбитальных параметров по методу наименьших квадратов, а я сосредоточился на сборе и обработке дальнейших данных о периоде пульсара и завершении обзорной работы, необходимой для моей диссертации. После того, как Джо отбыл обратно в Армхёрст, новые данные по двойному пульсару передавались между системой сбора данных (мной) и системой анализа орбиты (им) посредством моей диктовки длинных рядов цифр по коротковолновому радио — довольно узкополосной, но непосредственной линии передачи данных.

Анализ орбиты по Ньютону и по Эйнштейну

Двойная система с пульсаром, обнаруженная по вариациям периода, которые я только что показывал, схематически изображена на рис. 11. В отличие от остальных пульсаров, которые являются изолированными звездами, PSR 1913 + 16 обращается по тесной эксцентричной орбите вокруг невидимой звезды-компаньона. Рисуя эту схему, я воспользовался одной важной дополнительной информацией, неизвестной в момент открытия. Как скажет Джо Тэйлор в своем докладе, сейчас известно, что массы пульсара и звезды-компаньона идентичны, и, следовательно, орбиты каждой из компонент двойной системы нарисованы примерно одинакового размера.

Сочетание наблюдаемых вариаций периода, показанных на рис. 10, с данными, полученными из последующих наблюдений, позволили впервые построить полную кривую лучевых скоростей орбиты двойного пульсара. Измерения пульсарного периода, переведенные в соответствующие лучевые скорости, представлены на рис. 12, взятом из оригинальной статьи [3] об открытии пульсара, опубликованной в январе 1975 г. Эти скорости отложены в зависимости от орбитальной фазы орбитального периода 7 ч 45 мин.

Тот факт, что орбитальный период двойной системы оказался почти точно соизмерим с 24 часами, объясняет, почему наблюдаемые загадочные вариации периода пульсара ежедневно смещались на 45 минут. По чистой случайности орбитальный период пульсара оказался таким, что всякий раз, когда пульсар ежедневно попадал в поле зрения телескопа Аресибо, пульсар оказывался почти в той же самой точке своей орбиты. В результате я мог наблюдать почти точно такие же изменения периода в каждый следующий день наблюдений. Таким образом, оказавшийся критическим 45-минутный сдвиг, заметный на рис. 9, просто отражал разницу между тремя полными орбитальными периодами в 7 ч 45 мин и 24 ч. Если бы телескоп Аресибо мог отслеживать движение источника по небу и я мог таким образом наблюдать пульсар в течение более длительного времени каждый день, при интерпретации пульсара как двойной системы было бы меньше загадок и волнений. Но все-таки две важных особенности телескопа Аресибо облегчили решение этой проблемы. В первую очередь огромная чувствительность телескопа позволила мне обнаружить и затем провести повторные наблюдения пульсара с относительно коротким временем накопления, достаточным для того, чтобы пульсар был зарегистрирован несмотря на изменяющийся период. Более тонким преимуществом было то, что на Аресибо я имел редкую возможность

использовать инструмент для "большой науки" подручными средствами "малой науки". Я имел обширный доступ к использованию телескопного времени и мог быстро организовать, повторить и изменить свои наблюдения самым подходящим образом для разгадки тайны двойного пульсара.

На рис. 12, взятом из оригинальной статьи об открытии пульсара, также показана теоретическая кривая, описывающая наблюдаемые лучевые скорости движением по кеплеровской орбите, т.е. орбите, получающейся в рамках теории Ньютона. Анализ орбиты, примененный для этого первого формального описания данных двойного пульсара, был точно таким же, каким исторически используются астрономы-оптики для изучения двойных систем, известных как спектроскопические двойные с линиями одного компонента. Единственная разница в случае двойного пульсара состояла в том, что вместо наблюдения периодического смещения длины волны какой-нибудь линии в видимом спектре одной из компонент двойной системы, мы использовали периодическое смещение "спектральной линии", сформированной пульсирующим периодом пульсарных часов. И в самом деле, первое грубое решение элементов орбиты по наблюдаемой кривой лучевых скоростей было получено графическим способом, описанным в классической книге Эйткена "Двойные звезды" [4], первое издание которой вышло в 1935 г.! Эта ручная обработка данных была проделана в Аресибо с использованием кривых лучевых скоростей, нанесенных на перекрывающиеся листки кальки, скрепленные обычными канцелярскими скрепками. Результаты этой грубой подгонки позднее использовались как первое приближение для элементов орбиты, необходимое для начала более аккуратной численной подгонки по методу наименьших квадратов, результаты которой и вошли в статью.

Этот первоначально чисто кеплеровский анализ орбиты теперь давно уже заменен на полностью релятивистский, который проводится с исключительно высокой точностью по данным почти 20-летних наблюдений. Тем не менее орбитальные элементы, приведенные в первой статье и полученные из анализа этой кривой лучевых скоростей, немедленно после открытия PSR 1913 + 16 убедительно количественно показали, почему релятивистские эффекты очень важны для этой системы. Хотя кеплеровский анализ сам по себе не позволял определения полного набора параметров системы, его, конечно, было достаточно, чтобы увидеть захватывающую дыханием общую картину природы этой двойной системы: орбитальная скорость порядка $\sim 0,001$ скорости света, размер орбиты порядка радиуса нашего Солнца и массы компонент двойной системы порядка массы Солнца. Сжатое резюме следствий этих результатов было дано в первой статье:

"Это ... позволит изучать ряд интересных гравитационных и релятивистских явлений. Двойная система представляет почти идеальную релятивистскую лабораторию, состоящую из точных часов на высокоскоростной эксцентричной орбите в сильном гравитационном поле. Мы замечаем, например, что изменения v^2/c^2 и GM/c^2r вдоль орбиты достаточны для изменения наблюдаемого периода на несколько миллионных долей. Следовательно, будут легко измеримы как релятивистский эффект Допплера, так и эффект гравитационного красного смещения. Более того, общерелятивистское

смещение периастра должно достигать 4 градусов в год и будет обнаружено за короткое время. Измерение этих эффектов, обычно не наблюдаемых в спектроскопических двойных, позволит определить наклонение системы и массы отдельных компонент".

Как мы теперь знаем, даже эти амбициозные надежды недооценили все релятивистские следствия, которые можно было сделать из изучения этой системы. Но в то время пыл по поводу возможности наблюдения этих потенциально больших релятивистских эффектов был умерен опасениями насчет того, будет ли эта система достаточно "чистой", т.е. достаточно свободной от воздействия каких-нибудь усложняющих эффектов, чтобы можно было провести эти измерения. Однако к началу 1975 г., когда я начал писать мою диссертацию, появилось первое количественное свидетельство того, что эта система действительно могла стать удивительной релятивистской лабораторией и чем она на самом деле стала с тех пор.

Это свидетельство пришло в виде определения поворота периастра орбиты, измеренного с помощью более точного метода анализа времени прихода импульсов от двойного пульсара. Этот эффект общей теории относительности представляет собой поворот эллиптической орбиты в пространстве. Успех Эйнштейна в объяснении наблюдаемого смещения перигелия орбиты Меркурия 43" в столетие этим релятивистским эффектом был одним из первых триумфов общей теории относительности. Первые результаты теперь указывали на тот же самый эффект для орбиты двойного пульсара, но только с невероятной скоростью 4 градуса в год, в точном соответствии с предсказанной в первой статье величиной! Так что за 100 лет, которые понадобились бы для поворота перигелия орбиты Меркурия всего на 0,01 градус, орбита двойного пульсара повернулась бы более чем на 360 градусов, повернувшись более чем один раз! Это было действительно потрясающее подтверждение роли релятивистских эффектов в новой двойной системе с пульсаром. На самом деле, следует заметить, что поскольку открытие этого пульсара было сделано около 20 лет назад, его орбита повернулась из-за этого эффекта уже почти на 90 градусов, и если бы двойной пульсар был открыт сегодня, вид его кривой лучевых скоростей совершенно отличался бы от приведенного на рис. 12, взятого из первой статьи об открытии.

На этом месте я закончу свой рассказ о двойном пульсаре, что исторически соответствует завершению моей диссертации в Массачусеттском университете. В заключение разрешите мне прежде всего поблагодарить всех тех коллег из Массачусеттского университета и из Аресибо, кто помогал мне в работе над диссертацией и над всем тем, что последовало из нее. Я также хотел бы заметить, что долговременное изучение и анализ двойного пульсара был и остается трудоемкой задачей, которая требует максимума терпения, вдумчивости и научной подготовки. Я всегда чувствовал, что никто так не подходил к решению этой задачи, как тот человек, с которым я имею честь разделить эту премию. Так что теперь я с удовольствием передаю продолжение рассказа о двойном пульсаре тому, кем я восхищался как личностью и как ученым на протяжении более 20 лет, профессору Джозефу Тэйлору.

(Перевод с англ. К.А. Постнова)

Список литературы

1. Hulse R A, Taylor J H A high-senssitivity pulsar survey *Astrophys. J.* **191** L59 (1974, July 15)
2. Hulse R A, Taylor J H A deep sample of new pulsars and their spatial extent in the Galaxy *Astrophys. J.* **201** L55 (1975, October 15)
3. Hulse R A, Taylor J H Discovery of a pulsar in a binary system *Astrophys. J.* **195** L51 (1975, January 15)
4. Aitken R G *The Binary Stars* (New York: Dover Publ., 1964)