

## НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ — 1993

## Двойные пульсары и релятивистская гравитация

Дж. Х. Тэйлор (мл.)

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

PACS numbers: 97.60.G, 04.30. + x

## I. Поиск и открытие

Работа, приведшая к открытию первого пульсара в двойной системе, началась более двадцати лет тому назад, так что кажется вполне разумным начать немного с истории. Пульсары появились на научном горизонте [1] в феврале 1968 г., примерно месяц спустя после завершения моей работы над диссертацией в Гарвардском университете. Приняв предложение остаться там на пост-докторскую стипендию, я занялся поиском новых интересных радиоастрономических проектов. Когда журнал "Nature" сообщил об открытии странного неизвестного быстро пульсирующего радиоисточника, я вместе с гарвардскими коллегами немедленно сделал набросок предложения о наблюдениях его на 92 м-радиотелескопе Национальной радиоастрономической обсерватории. К концу весны мы обнаружили и изучили все четыре пульсара, открытые к тому времени Кембриджской группой, и я начал думать, как бы найти еще примеры этих замечательных объектов, о которых уже тогда думали, как о вероятных нейтронных звездах. Обычно пульсарные сигналы весьма слабы, но отличаются некоторыми уникальными характеристиками, которые и подсказали эффективную стратегию поиска. Пульсарные сигналы представляют собой модуляцию в форме периодических импульсов, наложенную на шумообразный фон. Как следствие распространения радиоволн в диспергирующей межзвездной среде, узкие импульсы принимаются смещенными в область низких частот. Я разработал компьютерный алгоритм для распознавания таких периодических дисперсных сигналов на фоне неизбежного шума, и в июне 1968 г. мы использовали эту программу для открытия пятого пульсара [2].

Поскольку излучение пульсаров обладало широким набором новых и неожиданных свойств, мы, наблюдатели, прилагали значительные усилия для его регистрации и изучения деталей и особенностей сигнала. Вскоре стало ясно, что модель пульсаров, в основе которой



Джозеф Х. Тэйлор (мл.)

лежит идея сильно замагниченной, быстро вращающейся нейтронной звезды, согласуется с большинством известных фактов [3]. Модель была успешно подтверждена открытием пульсаров внутри светящихся газовых остатков двух вспышек сверхновых, в которых должны были образоваться нейтронные звезды [4,5], а также наблюдаемым постоянным увеличением периодов пульсаров [6] и поляризационными измерениями, ясно указывающими на вращающийся источник [7]. Электродинамические свойства вращающейся замагниченной нейтронной звезды были изучены теоретически [8] и было показано, что такая звезда может генерировать широкополосный радиосум, который можно регистрировать на межзвездных расстояниях. Однако богатое разнообразие наблюдаемых радиоимпульсов указывало на гораздо более сложную структуру магнитосферы, чем предполагалось в теоретических моделях. Многие из нас подозревали, что детальное понимание механизма пульсарного излучения могло потребовать гораздо большего времени и что в любом случае даже эти подробности могли

Джозеф Х. Тэйлор (мл.) (Joseph H. Taylor, Jr.). Принстонский университет, физический факультет, Принстон, шт. Нью Джерси, 08543 США

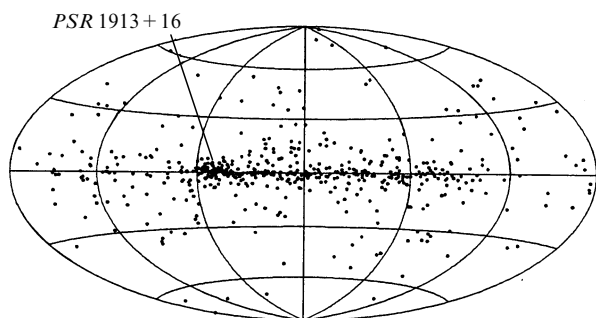


Рис. 1. Распределение 558 пульсаров в галактических координатах. Центр Галактики находится в центре, долгота увеличивается справа налево

оказаться не такими уж фундаментальными для выяснения сути явления.

В сентябре 1969 г. я перевелся на факультет Массачусеттского университета, на базе которого наша небольшая группа планировала построить большой дешевый радиотелескоп специально для наблюдения пульсаров. Для постройки нашего телескопа потребовалось несколько лет и в течение этого времени стало ясно, что как бы ни важна была физика магнитосферы пульсаров, они сами по себе были интересны и потенциально важны по ряду других причин. Как сколлапсировавшие остатки взрывов сверхновых, они могли дать уникальный экспериментальный материал о конечных стадиях эволюции звезд, так же как и возможность изучать свойства сверхплотной ядерной материи, из которой они состоят. Более того, было показано, что многие пульсары являются замечательно стабильными природными часами [9], создавая таким образом вызов гордости земных экспериментаторов; это имело приложения и следствия, о которых мы могли в то время только гадать. В силу этих причин, как таковых, к лету 1972 г. я посвятил большую часть своей исследовательской работы выполнению аккуратных временных измерений известных пульсаров, используя наш новый телескоп в западном Массачусетсе и планируя крупномасштабный поиск пульсаров с привлечением больших телескопов на национальных обсерваториях.

Я подозреваю, что нет ничего необычного в том, что обоснование эксперимента зависит, по крайней мере частично, от личных взглядов, совершенно не относящихся к заявленным научным целям. Стремление решить хорошую интеллектуальную задачу и спокойное удовлетворение от нахождения остроумного решения, конечно, должно стоять высоко в ряду моих собственных инициатив и наград. Если эксперимент кажется трудновыполнимым, но обещает возможные интересные следствия, его стоит попробовать осуществить. Поиск пульсаров — блестящий тому пример: ясно, что при поиске должно быть обнаружено много пульсаров, а после отождествления их уже не так трудно наблюдать. Однако найти каждый пульсар впервые является задачей огромной трудности, которая может превратиться в некое подобие детективного расследования. Чтобы играть в эту игру, вы изобретаете эффективные способы нахождения "улик", затем сортируете и взвешиваете каждую из них, надеясь разоблачить с их помощью все "виновные стороны" и определить их положение на небе.

Большинство из нескольких дюжины известных к началу 1972 г. пульсаров были открыты визуальным просмотром ленточных записей без использования преимущества последующей переобработки сигнала. Тем не менее было ясно, что использование цифровых компьютеров будет центральным пунктом более чувствительных поисковых обзоров. Обнаружение новых пульсаров по необходимости является многомерным процессом; вдобавок к обычным двум переменным — координатам пульсара — необходимо также варьировать в широких пределах период и меру дисперсии. Наш первый обзор пульсаров в 1968 г. искал следы пульсарных сигналов, вычислял дискретное преобразование Фурье для большой последовательности времени накопления интенсивности сигнала, учитывая ожидаемые узкие формы импульсов путем суммирования амплитуд более дюжины гармонически связанных частотных компонент. Я впервые описал этот основополагающий алгоритм [10] как часть обсуждения техники поиска пульсаров в 1969 г. Вскоре после этого был предложен эффективный компенсирующий дисперсию алгоритм [11,12], допускающий распространение метода на одновременный поиск двух параметров. Компьютеризованные поиски периода и меры дисперсии с использованием этих базовых алгоритмов к настоящему времени привели к открытию большинства из 600 известных пульсаров, включая сорок в двойных системах [13,14].

Кроме личных стимулов из разряда "охотничьего азарта", внешняя научная мотивация для планирования обширного обзора пульсаров в 1972 г. состояла в желании вдвое-втрое увеличить число известных пульсаров. Я имел в виду необходимость более надежного статистического базиса для выводов о полном числе пульсаров в Галактике, их пространственном распределении, о том, как они укладываются в схему звездной эволюции и т. д. Я также понимал [15], что было бы крайне желательно "...найти хоть *один* пример пульсара в двойной системе, ибо по измерению его параметров можно было бы определить массу пульсара, являющуюся крайне важной величиной". Меньше всего я подозревал, что именно такое открытие и будет сделано, или что это будет иметь гораздо большую значимость, чем кто-либо мог предвидеть! Теперь понимаю, что кроме важности двойного пульсара PSR 1913+16 самого по себе, он был предвестником нового класса необычно короткопериодических пульсаров с многочисленными важными приложениями.

Положение на небе известных на сегодняшний день пульсаров показано на рис. 1. Двойной пульсар PSR 1913+16 находится в скоплении объектов вблизи галактической плоскости на долготе  $50^\circ$ , в той части неба, которая проходила прямо в зените на широте Пуэрто-Рико. Сорок из этих пульсаров, включая PSR 1913+16, были открыты в обзоре, который мы с Расселом Халсом проводили на 305 м-радиотелескопе в Аресибо [16–18]. Рис. 2 иллюстрирует периоды и темпы замедления периодов известных пульсаров, причем двойные пульсары обведены кружочками. Все радиопульсары постоянно замедляют свое вращение в собственной системе отсчета, но сами темпы замедления периодов у разных пульсаров изменяются на девять порядков. Из рис. 2 видно, что двойные пульсары в этом отношении составляют выделенный класс. За немногими исключениями у них наблюдается как малое значение периода,

так и малое значение производной периода — важный факт, который помогает им стать особенно подходящими для высокоточных временных измерений.

Многое из подготовки и проведения нашего обзора на Аресибо в 1973–1974 гг. было сделано Расселом Халсом. Он описывает свою работу и особенно открытие PSR 1913+16 в своей Нобелевской лекции [19]. Значительные последствия нашего открытия потребовали аккуратных временных измерений на протяжении многих лет, и начиная с 1974–1976 гг. я выполнял их с другими моими коллегами. Теперь я перейду к описанию этих наблюдений.

## II. Эксперименты по сравнению часов

Эксперименты по таймингу пульсаров просты по сути: измеряются времена прихода импульсов (TOA, от *англ.* time of arrival) на телескоп и затем сравниваются с точным временным стандартом. Из этих простых измерений можно получить значительную информации о вращении пульсара, положении его в пространстве и орбитальном движении. Задача анализа последовательности TOA, особенно от двойных пульсаров, часто напоминает запутанное детективное расследование. Главные улики в этом деле — зарегистрированная последовательность TOA. Первая и наиболее трудная задача состоит в однозначном приписывании каждому принятому импульсу определенного времени прихода, независимо от того, что некоторые соседние ряды измерений могут быть разделены месяцами или даже годами. Во время таких неизбежных перерывов в наблюдениях пульсар, возможно, совершает  $10^7$ – $10^{10}$  оборотов, а чтобы извлечь максимальную информацию из данных наблюдений, целое число оборотов должно быть известно *точно*. К счастью, будучи найдена, правильная последовательность номеров импульсов легко распознается, так что вы можете точно сказать, когда первый матч "выигран".

Блок-схема оборудования, используемого для последних наблюдений тайминга пульсаров [20] на телескопе Аресибо, приведена на рис. 3. Принимаемые антенной радиосигналы усиливаются, преобразуются в сигналы промежуточной частоты и пропускаются через многоканальный спектрометр с квадратичными детекторами. Набор цифровых усреднителей сигнала собирает оценки периодических сигналов от пульсара в каждом спектральном канале, используя предвычисленную цифровую эфемериду и электрические контуры, синхронизованные с главными часами обсерватории. Программируемый синтезатор с выходной частотой, подстраиваемой с непрерывной фазой раз в секунду, компенсирует доплеровские сдвиги, вызванные ускорением пульсара и телескопа. Средние профили импульсов записываются раз в несколько минут вместе с соответствующими временными метками. Также производится учет небольших временных поправок в измерениях (обычно порядка 1 мкс), связанных с разницей хода обсерваторских часов и наилучших доступных часовых стандартов из национальных хранилищ времени, а синхронизация осуществляется через спутник Глобальной позиционной системы.

Пример профилей импульсов, зарегистрированных при наблюдениях пульсара PSR 1913+16, приведен на рис. 4, на котором показаны профили интенсивности в 32

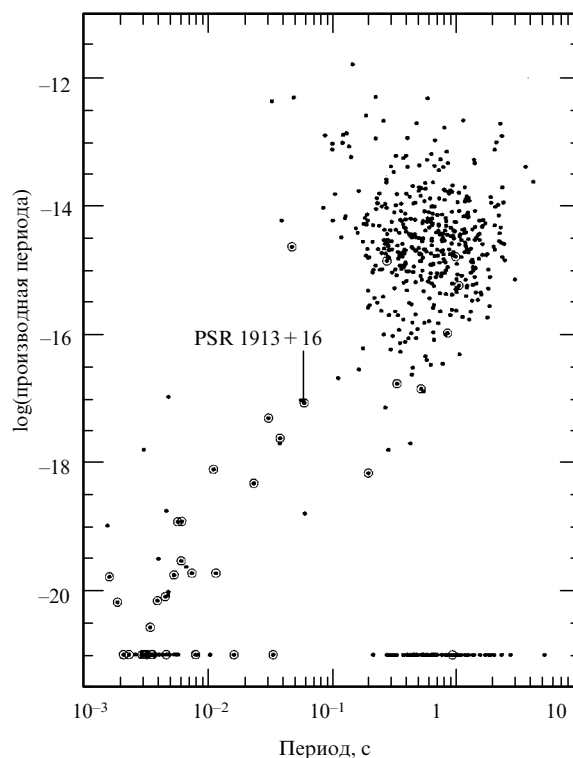


Рис. 2. Периоды и производные периодов для известных пульсаров. Двойные пульсары, обозначенные большими кружками вокруг точек, обычно имеют более короткие периоды и меньшие темпы замедления. Символы, лежащие вблизи нижней границы диаграммы, соответствуют пульсарам, для которых еще не измерены темпы замедления

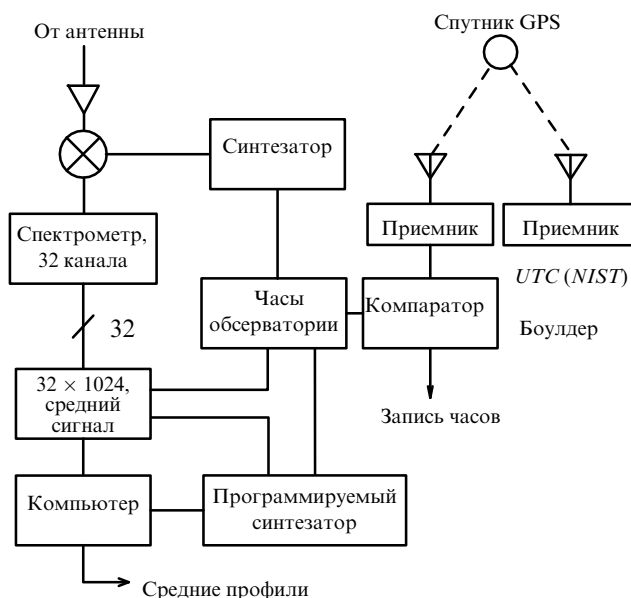


Рис. 3. Упрощенная блок-схема оборудования, используемого для тайминга пульсаров в Аресибо

спектральных каналах, покрывающих частотный диапазон 1383–1423 МГц; внизу приведен "де-дисперсный" профиль. При аналогичных пятиминутных наблюдениях отношение сигнала к шуму является как раз достаточно высоким, чтобы даже в отдельных каналах можно было заметить двухпиковую форму импульса PSR 1913+16. Времена прихода импульсов опреде-

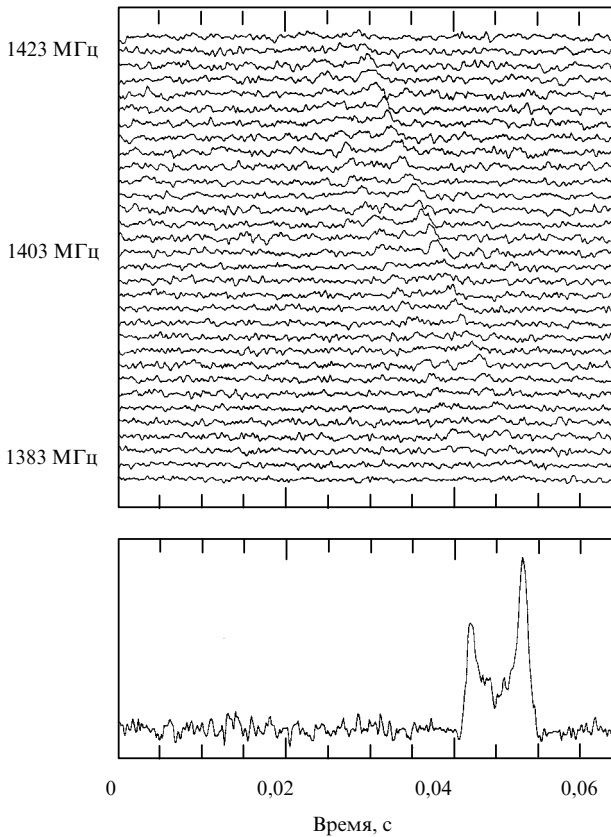


Рис. 4. Профили импульсов, полученные 24 апреля 1992 г. при пятиминутных наблюдениях PSR 1913 + 16. Характерный двухпиковый профиль, ясно видимый на дедиспергированном профиле, приведенном внизу, также различим в 32 индивидуальных спектральных каналах

ляются измерением фазового сдвига между каждым зарегистрированным профилем и импульсом, полученным при долговременном усреднении с гораздо более высоким отношением сигнала к шуму. После того, как устраняются дифференциальные дисперсные задержки и по всем каналам усредняются подобранные фазовые сдвиги, окончательному среднему значению приписывается соответствующее ТОА. Используя, по существу, такую же технику, для пульсара PSR 1913 + 16 с 1974 г. было получено примерно 5000 таких пятиминутных измерений. После нескольких модификаций системы сбора данных [21–26] типичная ошибка в определении ТОА уменьшилась с 300 мкс в 1974 г. до 15–20 мкс после 1981 г.

### III. Модельная подгонка

В процессе анализа данных каждое измеренное топоцентрическое значение ТОА, скажем,  $t_{\text{obs}}$  должно быть преобразовано к соответствующему собственному времени излучения  $T$  в системе отсчета пульсара. В предположении определенного закона торможения пульсара, фаза вращения пульсара определяется как

$$\phi(T) = \nu T + \frac{1}{2} \dot{\nu} T^2, \quad (1)$$

где  $\phi$  измеряется долями цикла,  $\nu \equiv 1/P$  — частота вращения,  $P$  — период и  $\dot{\nu}$  — скорость торможения. Так как топоцентрическое ТОА является релятивистским

событием в пространстве-времени, оно должно быть преобразовано, как четырехвектор. Положение телескопа в момент измерения находится из численно проинтегрированной модели солнечной системы, учитывая опубликованные данные о непредсказуемых вариациях вращения Земли. Первым шагом обычно является приведение ТОА к барицентру солнечной системы, используя приближение слабого гравитационного поля (низкоскоростного предела) общей теории относительности. Необходимые уравнения включают члены, зависящие от положений, скоростей и масс всех значительных тел солнечной системы. Затем учитываются эффекты распространения сигнала в межзвездной среде, и наконец, учитывается орбитальное движение самого пульсара.

С достигнутой на сегодняшний день точностью все значимые члены в этом релятивистском преобразовании могут быть записаны как одно выражение:

$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_c - \frac{D}{f^2} + \Delta_{R\odot}(\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi) + \\ + \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot}(\alpha, \delta) - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \\ - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s). \quad (2)$$

Здесь  $t_0$  — номинальные значения ТОА, приведенные к барицентру солнечной системы;  $\Delta_c$  обозначает измеренную поправку часов;  $D/f^2$  — дисперсионная задержка при распространении сигнала на частоте  $f$  через межзвездную среду;  $\Delta_{R\odot}$ ,  $\Delta_{E\odot}$  и  $\Delta_{S\odot}$  — релятивистские поправки времени распространения сигнала в солнечной системе;  $\Delta_R$ ,  $\Delta_E$  и  $\Delta_S$  — поправки на те же эффекты при движении пульсара по орбите. Индексы при различных  $\Delta$  указывают на природу временной задержки и обозначают задержки "Рёмера", "Эйнштейна" и "Шапира" внутри солнечной системы и в двойной системе пульсара. Рёмеровские члены имеют амплитуду порядка орбитального периода, умноженного на величину  $v/2\pi c$ , где  $v$  — орбитальная скорость и  $c$  — скорость света. Эйнштейновские члены, представляющие суммарные эффекты гравитационного красного смещения и замедления времени, меньше на фактор  $ev/c$ , где  $e$  — эксцентриситет орбиты. Задержка Шапира возникает в результате эффективного уменьшения скоростей, сопровождающего хорошо известный эффект искривления траекторий лучей в поле гравитирующей массы. Эта задержка достигает примерно 120 мкс для лучей света, проходящих вблизи поверхности Солнца, а величина эффекта зависит логарифмически от углового прицельного параметра. Соответствующая задержка внутри орбиты двойного пульсара зависит от массы второго компонента, орбитальной фазы и наклона  $i$  орбитального углового момента к лучу зрения.

Рис. 5 иллюстрирует суммарную орбитальную задержку  $\Delta_R + \Delta_E + \Delta_S$  для пульсара PSR 1913 + 16 в зависимости от орбитальной фазы. Несмотря на то, что эффекты Эйнштейна и Шапира на порядок величины меньше рёмеровской задержки, они тем не менее должны быть измерены отдельно, если точность принятых ТОА достаточно хорошая. В действительности достигаемая точность чрезвычайно высока, как можно видеть уже из данных, приведенных на рис. 5 с ошибками  $50\,000\sigma$ .

Уравнения (1) и (2) были выписаны, чтобы в явном виде показать наиболее значительные зависимости фазы пульсара от ни много, ни мало, а 19 а priori неизвестных. Кроме частоты вращения  $\nu$  и скорости замедления  $\dot{\nu}$ , в

число этих феноменологических параметров входит время прихода импульсов  $t_0$ , постоянная дисперсии  $D$ , небесные координаты источника  $\alpha$  и  $\delta$ , компоненты собственного движения  $\mu_\alpha$  и  $\mu_\delta$  и годичный параллакс  $\pi$ . Для двойных пульсаров также важны члены во второй строке уравнения (2), включающие десять значимых орбитальных параметров. К числу дополнительных параметров относятся пять, требуемых даже для чисто кеплеровского анализа орбитального движения: проекция большой полуоси  $x \equiv a_1(\sin i)/c$ , эксцентриситет  $e$ , период двойной системы  $P_b$ , долгота периастра  $\omega$  и момент прохождения периастра  $T_0$ . Если экспериментальная точность достаточно высока, релятивистские эффекты дают еще пять "пост-кеплеровских" параметров: вековые изменения  $\dot{\omega}$  и  $\dot{P}_b$ , параметр Эйнштейна  $\gamma$ , величину и вид орбитальной задержки Шапиро,  $r$  и  $s \equiv \sin i$ . Существуют несколько ранних вариантов этого формализма для интерпретации временных измерений двойных пульсаров [27–29], которые исторически были важны для прогресса в наших исследованиях PSR 1913+16. Элегантная схема, очерченная здесь, была разработана в 1985–1986 гг. Дамуром и Дерюзлем [30, 31].

Модельные параметры извлекаются из последовательности TOA путем вычисления фазы пульсара  $\phi(T)$  из уравнения (1), минимизируя сумму квадратов отклонений

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\phi(T_i) - n_i}{\sigma_i/P} \right)^2, \quad (3)$$

по отношению к каждому определяемому параметру. В этом выражении  $n_i$  обозначает ближайшее целое число к  $\phi(T_i)$ , а  $\sigma_i$  есть оценка неточности  $i$ -го TOA. Пригодным и надежным решением считается то, в котором величина  $\chi^2$  близка к числу степеней свободы, т. е. к числу измерений  $N$  за вычетом числа подгоняемых параметров. Ошибки параметров такие, что ближайшее целое к  $\phi(T_i)$  может оказаться неверным номером импульса, непременно сопровождаются резким увеличением величины  $\chi^2$ ; в этом причина моего утверждения, сделанного ранее, что правильная нумерация импульсов легко распознаваема. Решение методом наименьших квадратов сверх того, что дает значения подгоняемых параметров и оценку их ошибок, позволяет получить последовательность остаточных уклонений, т. е. разность между измеренными и модельными TOA (рис. 6). Остаточные уклонения тщательно исследуются с целью поиска систематических трендов, которые могут свидетельствовать либо о наличии экспериментальных ошибок, либо о некоторой неадекватности астрофизической модели, либо, возможно, о более глубоких физических причинах, связанных с природой гравитации.

Некоторые параметры модели с необходимостью легче измеряются, чем другие. Когда в распоряжении имеется много последовательностей TOA, полученных на протяжении многих месяцев или лет, обычно с довольно высокой точностью, доходящей до 6–14 значащих десятичных цифр, измеряются по крайней мере параметры вращения и небесные координаты пульсара, а также кеплеровские элементы орбиты. Как мы увидим, измерить релятивистские параметры орбит двойных пульсаров обычно бывает гораздо труднее, но зато и потенциальное вознаграждение за это весьма значительное.

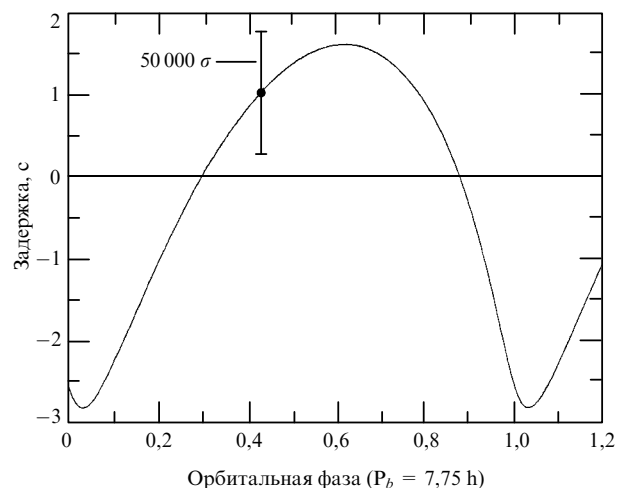


Рис. 5. Орбитальные задержки, наблюдавшиеся для PSR 1913+16 в июле 1988 г. Индивидуальная ошибка пятиминутного наблюдения обычно в 50 000 раз меньше, чем показанная вертикальным отрезком

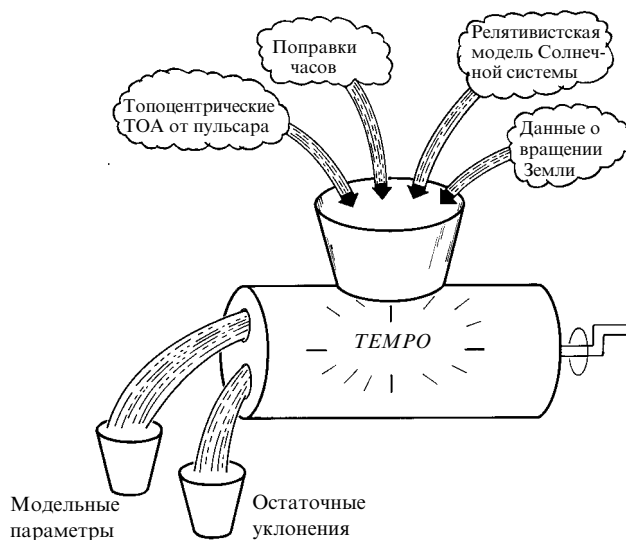


Рис. 6. Схематическая диаграмма анализа измерений пульсарного тайминга, осуществляемого программой TEMPO. Все основные функции описаны в тексте

#### IV. Ньютоновский предел

В настоящее время достаточно хорошо изучены тридцать пять двойных систем с пульсарами и с хорошей точностью определены их основные параметры, включающие кеплеровские орбитальные элементы. Орбитальный период  $P_b$  и проекция большой полуоси  $x$  могут быть скомбинированы в так называемую функцию масс двойной системы:

$$f_1(m_1, m_2, s) = \frac{(m_2 s)^3}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{x^3}{T_\odot (P_b/2\pi)^2}. \quad (4)$$

Здесь  $m_1$  и  $m_2$  — массы пульсара и его компонента в единицах массы Солнца  $M_\odot$ , и используются сокращения  $s \equiv \sin i$ ,  $T_\odot \equiv GM_\odot/c^3 = 4,925\,459\,094\,7 \cdot 10^{-6}$  с, где  $G$  — постоянная тяготения Ньютона. При отсутствии другой информации функция масс не может дать единственного решения для  $m_1$ ,  $m_2$  или  $s$ . Тем не менее возможные значения  $m_2$  могут быть оценены в предположении, что

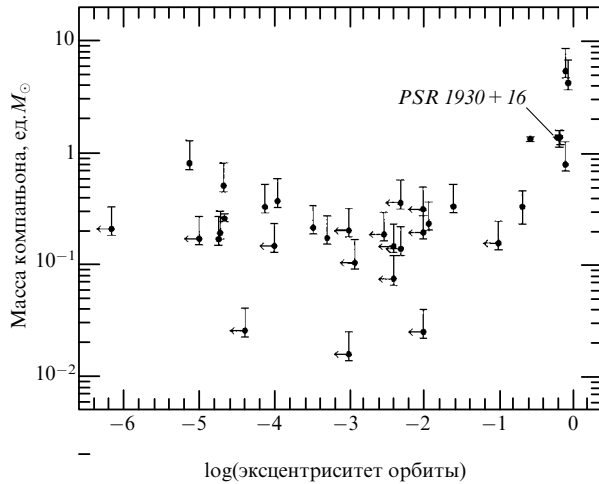


Рис. 7. Массы компонент двойных пульсаров, отложенные в зависимости от эксцентриситета. Вблизи отмеченного положения PSR 1913 + 16 три различных символа слились в один; эти три двойные системы, также как и их два ближайших соседа на графике, как полагают, являются двойными нейтронными звездами. Два пульсара справа сверху входят в состав двойных систем с массивными звездами главной последовательности, а оставшиеся пульсары, как думают, имеют компонентами белые карлики

масса пульсара близка к  $1,4M_{\odot}$  (предел Чандрасекара для белых карликов), а среднее значение  $\cos i = 0,5$ , что соответствует  $s = 0,87$ . При таком подходе можно различить три категории двойных пульсаров, которые я буду обсуждать, ссылаясь на рис. 7: зависимость массы компаньона двойных пульсаров от орбитального эксцентриситета.

Двадцать восемь двойных систем из рис. 7 имеют эксцентриситет орбиты  $e < 0,25$  и маломассивные ком-

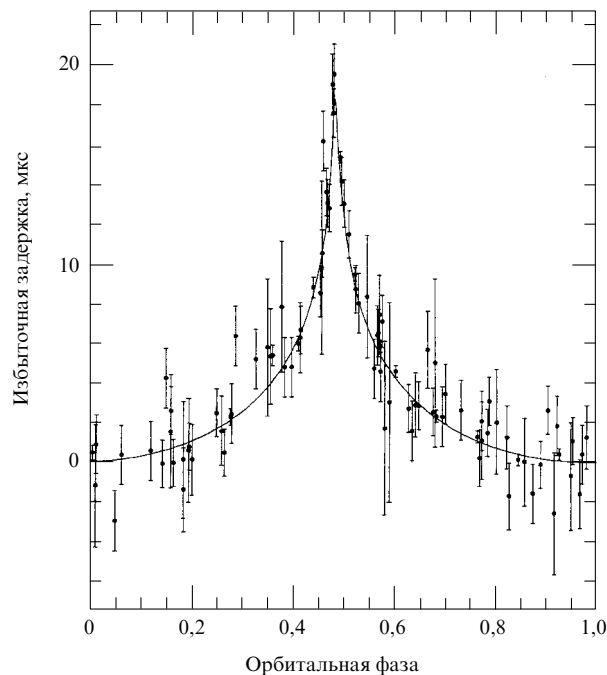


Рис. 8. Измерения временной задержки Шапиро для PSR 1855 + 09. Теоретическая кривая соответствует уравнению (10), а подогнанные значения  $r$  и  $s$  могут быть использованы для определения масс пульсара и его компаньона

поненты, по всей видимости вырожденные карлики. Большинство из них находится на круговых орбитах; действительно, только те, у которых эксцентриситет больше нескольких процентов, находятся в шаровых скоплениях, и их орбиты, вероятно, подверглись воздействию близких пролетов соседних звезд. Пять из этих двойных систем имеют большой эксцентриситет и вероятная масса вторых компонент в них около или больше  $0,8M_{\odot}$ ; полагают, что эти системы состоят из двух нейтронных звезд, одна из которых детектируется, как пульсар. Их большие орбитальные эксцентриситеты почти наверняка являются следствием быстрого выброса массы во время вспышки сверхновой, породившей вторую нейтронную звезду. Наконец, справа сверху рис. 7 можно видеть два двойных пульсара, которые обращаются по орбитам вокруг звезд главной последовательности большой массы. Эти системы еще не доэволюционировали до стадии второй вспышки сверхновой. В отличие от двойных пульсаров с компактными компонентами, орбиты этих двойных систем могут быть существенно подвержены влиянию усложняющих приливных эффектов или потери массы.

## V. Прикладная общая теория относительности

Как было предложено Расселлом Халсом и мной [17] в первой же статье об открытии PSR 1913 + 16, измерения релятивистских параметров орбиты в сочетании с функцией масс позволят определить массы обеих звезд и наклонение орбиты. В рамках пост-кеплеровского (РК) анализа, описанного выше, каждый измеренный РК-параметр определяет единственную кривую на плоскости  $(m_1, m_2)$ , точную в рамках специальной теории относительности. Экспериментальные значения для любых двух РК-параметров (скажем,  $\dot{\omega}$  и  $\gamma$  или возможно  $r$  и  $s$ ) однозначно определяют значения  $m_1$ ,  $m_2$  и  $s$ . Уравнения общей теории относительности для пяти наиболее значительных РК-параметров записываются в виде [25, 31, 32]:

$$\dot{\omega} = 3 \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{-5/3} (T_{\odot} M)^{2/3} (1 - e^2)^{-1}, \quad (5)$$

$$\gamma = e \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{1/3} T_{\odot}^{2/3} M^{-4/3} m_2 (m_1 + 2m_2), \quad (6)$$

$$\dot{P}_b = -\frac{192\pi}{5} \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{-5/3} \left( 1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right) \times \\ \times (1 - e^2)^{-7/2} T_{\odot}^{5/3} m_1 m_2 M^{-1/3}, \quad (7)$$

$$r = T_{\odot} m_2, \quad (8)$$

$$s = x \left( \frac{P_b}{2\pi} \right)^{-2/3} T_{\odot}^{-1/3} m_2^{-1}. \quad (9)$$

Здесь снова  $m_1$ ,  $m_2$  и  $M \equiv m_1 + m_2$  выражены в солнечных единицах. Я подчеркиваю, что в левые части уравнений (5)–(9) входят только непосредственно измеряемые величины, по крайней мере в принципе. Два любых таких измерения вместе с хорошо известными значениями  $e$  и  $P_b$  дают однозначное решение для  $m_1$  и  $m_2$ , а также явные предсказания для остальных РК-параметров.

РК-параметры вероятнее всего надежно измерить у двойных систем с большими массами и эксцентриситетами, которые астрофизически "чисты" в том смысле,

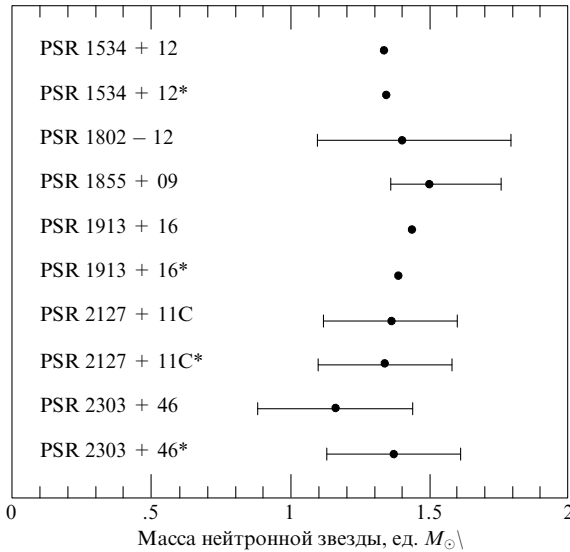


Рис. 9. Массы десяти нейтронных звезд, измеренные по наблюдению релятивистских эффектов в орбитах двойных систем

что их орбиты определяются практически только гравитационным взаимодействием двух компактных масс. Пять пульсаров, которые находятся вблизи PSR 1913+16 на рис. 7, казались наиболее подходящими кандидатами для этих измерений, и это было практически осуществлено. При наиболее благоприятных условиях измерения важных пост-кеплеровских параметров можно провести даже для пульсаров с маломассивными компаньонами на почти круговых орбитах. Наилучшим примером тому является PSR 1855+09: его орбитальная плоскость практически параллельна лучу зрения, из-за чего задержка Шапиро сильно возрастает. Соответствующие измерения [33–35] иллюстрируются рис. 8, на котором также показаны подогнанные функции  $\Delta s(r, s)$ , в данном случае приближенные функцией

$$\Delta s = -2r \log\{1 - 3 \cos[2\pi(\phi - \phi_0)]\}, \quad (10)$$

где  $\phi$  — орбитальная фаза и  $\phi_0 = 0,4823$  — фаза верхнего соединения. Подогнанные значения  $r$  и  $s$  дают значения масс  $m_1 = 1,50^{+0,26}_{-0,14}$ ,  $m_2 = 0,258^{+0,028}_{-0,016}$ . Подобным образом можно определить значения масс компонент у всех двойных пульсаров с измеряемыми РК-параметрами. В настоящее время большинство экспериментальных данных о массах нейтронных звезд (рис. 9) получается из такого временного анализа двойных систем с пульсарами [36, 37 и ссылки там].

## VI. Тест для гравитационных волн

Если для конкретного двойного пульсара можно измерить три или больше пост-кеплеровских параметра, система уравнений становится переопределенной, и лишние экспериментальные степени свободы превращают двойную систему в лабораторию по проверке релятивистской теории гравитации. Каждый лишний РК-параметр, измеренный сверх первых двух, по существу, является таким количественным тестом. Поскольку скорости и гравитационные энергии компонент массивной двойной системы с пульсаром могут быть существенно релятивистскими, начинают сказываться эффекты сильного поля и радиационных поправок. К настоящему времени два двойных пульсара PSR 1913+16 и PSR 1534+12 изучены с достаточно высокой точностью и достаточно долго, чтобы получить три и более РК-параметра. Каждый из них может служить важным тестом гравитации дальше пределов слабого поля и движений с малыми скоростями [32, 38].

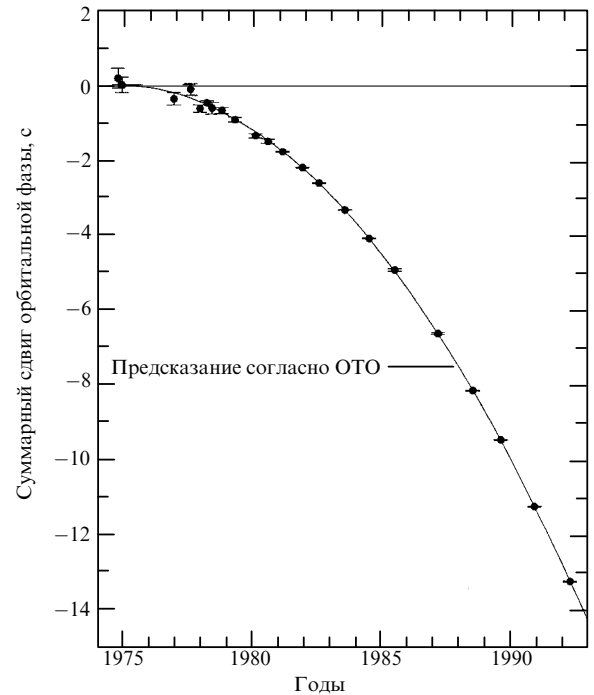


Рис. 10. Накопленные времена сдвига периастра в системе PSR 1913+16, отнесенные к предполагаемой орбите с постоянным периодом. Параболическая кривая представляет собой релятивистское предсказание для потерь энергии из-за гравитационного излучения

PSR 1913+16 имеет орбитальный период  $P_b \cong 7,8$  ч, эксцентриситет  $e \cong 0,62$  и функцию масс  $f_1 \cong 0,13 M_\odot$ . В пределах достижимой точности данных и длительности временных интервалов кепплеровские параметры орбиты, действительно, определяются с точностью до нескольких миллионных долей или выше. Вдобавок, точность определения РК-параметров  $\dot{\omega}$ ,  $\gamma$  и  $\dot{P}_b$  в этих системах лучше  $3 \cdot 10^{-6}$ ,  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $4 \cdot 10^{-3}$ , соответственно [25, 39]. Согласно любой реалистичной современной теории гравитации, значения  $\dot{\omega}$  и  $\gamma$  дают массы  $m_1$  и  $m_2$ , а также соответствующее предсказание для  $\dot{P}_b$ , обусловленное эффектом излучения гравитационных волн. При существующем уровне точности должна учитываться даже малая кинематическая поправка (примерно 0,5 % наблюдаемого  $\dot{P}_b$ ), связанная с ускорением солнечной системы и двойного пульсара в поле тяжести Галактики [40]. Прделав эти измерения, мы находим, что теория Эйнштейна выдерживает такую проверку с точностью лучше 0,4 % (рис. 10, 11). Таким образом, эксперимент по таймингу PSR 1913+16 дает прямое экспериментальное доказательство, что гравитационные возмущения распространяются со скоростью света и тем самым создают механизм диссипации орбитальной энергии двойной системы. Отсюда с необходимостью следует, что гравитационное излучение существует и имеет квадрупольный характер.

PSR 1534+12 был открыт всего три года назад в обзоре Александра Воллмана [41], который снова использовал преимущества огромного телескопа в Аресибо. Этот пульсар в конечном счете обещает превзойти результаты, достигнутые ныне для PSR 1913+16. Его орбитальный период  $P_b \cong 10,1$  ч, эксцентриситет  $e \cong 0,27$  и функция масс  $f_1 \cong 0,31 M_\odot$ . Более того, этот пульсар имеет более сильный сигнал и более узкий импульс, чем PSR 1913+16, так что его последовательность ТОА имеет меньшие экспериментальные погрешности — всего около 3 мкс при пятиминутном сеансе наблюдений. По результатам 15-месячных наблюдений [38] уже получены значимые измерения четырех РК-параметров:  $\dot{\omega}$ ,  $\gamma$ ,  $r$  и  $s$ . В недавней, еще не опубликованной, работе Воллман и я измерили скорость изменения орбитального периода  $\dot{P}_b$  для системы PSR 1534+12, которая оказалась в согласии с предсказаниями общей теории относительности с точностью около 20 %. На самом деле измеренные параметры системы PSR 1534+12 согласуются с общей теорией относительности, и кажется, что когда полный экспериментальный анализ будет завершен, теория относительности Эйнштейна пройдет еще три более строгих проверки в приближении сильного поля и радиационных поправок.

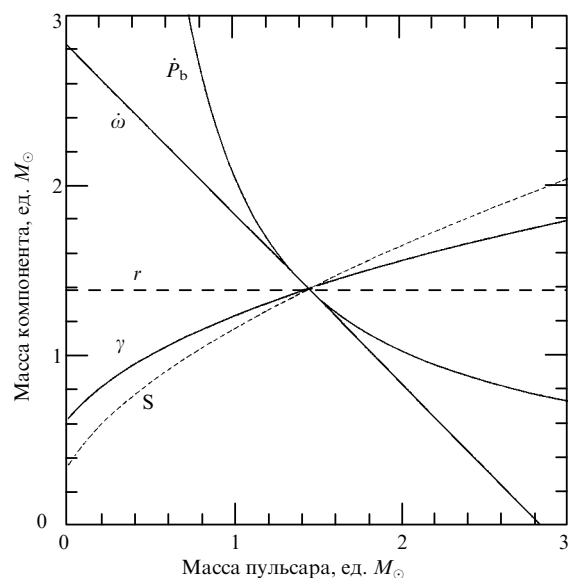


Рис. 11. Сплошная кривая соответствует уравнениям (5)–(7), в которые подставлены измеренные значения  $\dot{\omega}$ ,  $\gamma$  и  $\dot{P}_b$ . Их пересечение в одной точке (в пределах экспериментальной точности 0,35 % в  $\dot{P}_b$ ) свидетельствует о существовании гравитационных волн. Пунктирные кривые соответствуют *предсказанным* значениям параметров  $r$  и  $s$ ; эти величины должны быть измерены уже после умеренного улучшения качества наблюдательных данных

Я все же полагаю, что общая теория относительности включает в себе необходимые слова для адекватного описания природы гравитации. Эта теория, конечно, не квантовая, а на своем самом фундаментальном уровне Вселенная, как кажется, подчиняется квантовомеханическим законам. Тем не менее наши эксперименты с двойными пульсарами показывают, что какими бы ни были точные направления будущих теоретических работ, правильная теория гравитации должна давать предсказания, которые в пределе должны быть асимптотически близки к предсказаниям общей теории относительности для огромного количества классических эффектов.

## Благодарность

Рассел Халс и я должны поблагодарить многих коллег за их важные как теоретические, так и экспериментальные работы, без которых наше открытие PSR 1913+16 не могло бы так быстро принести такие обильные плоды. Наиболее замечательные среди них Роджер Блэндфорд, Тибо Дамур, Ли Фаулер, Питер Мак-Каллох, Джоэль Вайсберг, а также умелый и опытный технический персонал обсерватории Аресибо.

(Перевод с англ. К.А. Постнова)

## Список литературы

- Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H, Scott P F, Collins R A Observation of a rapidly pulsating radio source *Nature* **217** (5130) 709 (1968) (Перевод: УФН **95** (4) 705 (1968). – *Ред.*)
- Huguenin G R, Taylor J H, Goad L E, Hartai A, Orsten G S F, Rodman A K New pulsating radio source *Nature* **219** 576 (1968)
- Gold T Rotating neutron stars as the origin of the pulsating radio sources *Nature* **218** 731 (1968)
- Staelin D H, Reifenstein E C, III. Pulsating radio sources near the Crab Nebula *Science* **162** 1481 (1968)
- Large M I, Vaughan A E, Mills B Y A pulsar supernova association. *Nature* **220** 340 (1968)
- Richards D W, Comella J M The period of pulsar NP 0532 *Nature* **222** 551 (1969)
- Radhakrishnan V, Cooke D J Magnetic poles and the polarization structure of pulsar radiation *Astrophys. Lett.* **3** 225 (1969)
- Goldreich P, Julian W H Pulsar electrodynamics *Astrophys. J.* **157** 869 (1969)
- Manchester R N, Peters W L. Pulsar parameters from timing observations *Astrophys. J.* **173** 221 (1972)
- Burns W R, Clark B G Pulsar search techniques *Astron. and Astrophys.* **2** 280 (1969)
- Manchester R N, Taylor J H, Huguenin G R New and improved parameters for twenty two pulsar *Nature Phys. Sci.* **240** 74 (1972)
- Taylor J H A sensitive method for detecting dispersed radio emission *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **15** 367 (1974)
- Taylor J H, Manchester R N, Lyne A G Catalog of 558 pulsars *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **88** 529 (1993)
- Camilo F Millisecond pulsar searches. In *Lives of the Neutron Stars* (Ed. Alpar A) (*NATO ASI-Series*) (Dordrecht, Holland, Kluwer, 1994)
- Taylor J H A high sensitivity survey to detect new pulsars. Research proposal submitted to the US National Science Foundation. September 1972
- Hulse R A, Taylor J H A high sensitivity pulsar survey *Astrophys. J. (Letters)* **191** L59 (1974)
- Hulse R A, Taylor J H. Discovery of a pulsar in a binary system. *Astrophys. J.* **195** L51 (1975)
- Hulse R A, Taylor J H A deep sample of new pulsar and their spatial extent in the galaxy *Astrophys. J. (Letters)* **201** L55 (1975)
- Hulse R A The discovery of the binary pulsar. In *Les Prix Nobel* (Stockholm: The Nobel Foundation, 1994) (Перевод: УФН **164** (7) 743 (1994); см. предыдущую публикацию в этом номере журнала. – *Ред.*)
- Taylor J H Millisecond pulsars: Nature's most stable clocks *Proc. IEEE* **79** 1054 (1991)
- Taylor J H, Hulse R A, Fowler L A, Gullahorn G E, Rankin J M Further observations of the binary pulsar PSR 1913+16 *Astrophys. J.* **206** L53 (1976)
- McCulloch P M, Taylor J H, Weisberg J M Tests of a new dispersion-removing radiometer on binary pulsar PSR 1913+16, *Astrophys. J. (Letters)* **227** L133 (1979)
- Taylor J H, Fowler L A, McCulloch P M Measurements of general relativistic effects in the binary pulsar PSR 1913+16 *Nature* **277** 437 (1979)
- Taylor J H, Weisberg J M A new test general relativity: Gravitational radiation and the binary pulsar PSR 1913+16 *Astrophys. J.* **253** 908 (1982)
- Taylor J H, Weisberg J M Further experimental tests of relativistic gravity using the binary pulsar PSR 1913+16 *Astrophys. J.* **345** 434 (1989)
- Stinebring D R, Kaspi V M, Nice D J, Ryba M F, Taylor J H, Thorsett S E, Hankins T H A flexible data acquisition system for timing pulsars *Rev. Sci. Instrum.* **63** 3551 (1992)
- Blandford R, Teukolsky S A Arrival-time analysis for a pulsar in a binary system *Astrophys. J.* **205** 580 (1976)
- Epstein R. The binary pulsar: Post Newtonian timing effects *Astrophys. J.* **216** 92 (1977)
- Haugan M P Post-Newtonian arrival-time analysis for a pulsar in a binary system *Astrophys. J.* **296** 1 (1985)
- Damour T, Deruelle N General relativistic celestial mechanics of binary systems. I. The post-Newtonian motion *Ann. Inst. H. Poincaré (Physique Théorique)* **43** 107 (1985)
- Damour T, Deruelle N General relativistic celestial mechanics of binary systems. II. The post-Newtonian timing formula *Ann. Inst. H. Poincaré (Physique Théorique)* **44** 263 (1986)
- Damour T, Taylor J H Strong-field test of relativistic gravity and binary pulsars *Phys. Rev. D* **45** 1840 (1992)
- Rawley L A, Taylor J H, Davis M M Fundamental astrometry and millisecond pulsars *Astrophys. J.* **326** 947 (1988)
- Ryba M F, Taylor J H High precision timing of millisecond pulsars. I. Astrometry and masses of the PSR 1855+09 system *Astrophys. J.* **371** 739 (1991)
- Kaspi V M, Taylor J H, Ryba M High-precision timing of millisecond pulsars. III. Long-term monitoring of PSRs B1855+09 and B1937+21 *Astrophys. J.* (1994) (in press)
- Taylor J H, Dewey R J Improved parameters for four binary pulsars *Astrophys. J.* **332** 770 (1988)
- Thorsett S E, Arzoumanian Z, McKinnon M M, Taylor J H The masses of two binary neutron star systems *Astrophys. J. (Letters)* **405** L29 (1993)
- Taylor J H, Wolszczan A, Damour T, Weisberg J M Experimental constraints on strong-field relativistic gravity *Nature* **355** 132 (1992)
- Taylor J H. Testing relativistic gravity with binary and millisecond pulsars. In *General Relativity and Gravitation 1992* (Eds. Gleiser R J, Korameh C N, Moreschi O M) (Bristol: Institute of Physics Publishing, 1993) p. 287
- Damour T, Taylor J H. On the orbital period change of the binary pulsar PSR 1913+16 *Astrophys. J.* **366** 501 (1991)
- Wolszczan A. A nearby 37.9 ms radio pulsar in a relativistic binary system *Nature* **350** 688 (1991)