

ПРИРОДА

№ 1, 2003 г.

Лауреаты нобелевской премии 2002 г.

Герштейн С.С., Шакура Н.И.

По физике - Р. Дэвис, М. Кошиба, Р. Джуаккони

© “Природа”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 00-07-90172)

vivovoco.rsl.ru
vivovoco.usu.ru
vivovoco.nns.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Лауреаты Нобелевской премии 2002 года

По физике — Р.Дэвис, М.Кошиба, Р.Джиаккони

Нобелевская премия по физике за 2002 г. присуждена одному японскому и двум американским ученым за открытия, благодаря которым возникли новые области науки — нейтринная астрофизика и рентгеновская астрофизика.

Рэймонд Дэвис младший (Raymond Davis Jr.) и Масатоши Кошиба (Masatoshi Koshiba) удостоены самой престижной международной награды за свой «вклад в астрофизику, связанный, в частности, с детектированием космических нейтрино».

Р.Дэвис родился в 1914 г. в Вашингтоне (США). Закончил Университет Мериленда в 1940 г., ученую степень по физической химии получил в 1942 г. в Йельском университете (Коннектикут). С 1942 по 1946 г. служил в американской армии, с 1948 г. работал в Брукхейвенской национальной лаборатории, затем — в Пенсильванском университете (с 1985 г.). Сейчас является почетным профессором факультета физики и астрономии Университета Пенсильвании (Филадельфия).

М.Кошиба, уроженец Японии (1926), окончил Токийский университет (1951), а в аспирантуре учился в США, в Университете Рочестера (Нью-Йорк), где в 1955 г. защитил диссертацию по физике. С 1970 по 1987 г. был профессором физического факультета То-

кийского университета. В настоящее время — почетный профессор Международного центра физики элементарных частиц при этом университете.

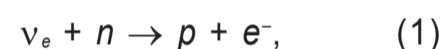
Проблема регистрации нейтрино от Солнца, которую решили впервые Р.Дэвис и М.Кошиба (последний подтвердил и дополнил результаты эксперимента Дэвиса), имеет длительную историю*.

Впервые на реальную возможность зарегистрировать нейтрино указал Б.М.Понтекорво в 1946 г. До этого подобная задача представлялась совершенно невыполнимой из-за чрезвычайно слабого взаимодействия нейтрино с веществом. Так, средняя длина свободного пробега нейтрино с энергией несколько МэВ в плотном веществе превышает 10^{19} — 10^{20} см, т.е. в миллионы раз больше расстояния от Земли до Солнца. Понтекорво заметил, что мощными источниками нейтрино, наряду с Солнцем, могут быть недавно созданные ядерные реакторы и даже ускорители. Интенсивный поток нейтрино от них позволяет зарегистрировать единичные акты реакций, вызываемые нейтрино, в достаточно большом детекторе.

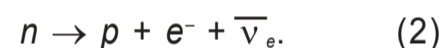
Для детектирования нейтрино он предложил радиационно-химический метод детектирования нейтрино, заключающийся в следующем. Нейтрино (точнее, *электрон-*

* Подробнее об этом см.: Бакал Дж. Нейтринная астрофизика. М., 1993.

ное нейтрино ν_e) может вызывать на нейтронах, входящих в ядра мишени, реакцию



обратную реакции бета-распада:



Если реакция (1) приводит к образованию радиоактивных ядер, которые можно извлечь из мишени и, смешав с нерадиоактивным изотопом соответствующего элемента, поднести к чувствительному детектору, есть шанс зарегистрировать буквально единичные акты реакции образования радиоактивных ядер по их распаду и таким образом — нейтрино.

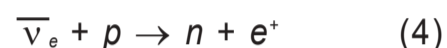
Для этих целей Понтекорво рассмотрел в 1946 г. реакцию



порождающую радиоактивные атомы аргона-37. Данный метод имеет замечательные достоинства: во-первых, атомы аргона не вступают в химическую реакцию с веществом и поэтому их можно извлечь из мишени, содержащей сотни тонн жидкого соединения хлора, продувая ее гелием в смеси с обычным аргоном; во-вторых, время полураспада радиоактивного ${}^{37}\text{Ar}$ (~34 сут) достаточно для его накопления и анализа ; в-третьих, необходимый изотоп ${}^{37}\text{Cl}$

содержится в природном хлоре в приемлемой концентрации (~24%). Для выделения актов распада ^{37}Ar на фоне посторонней (природной) радиоактивности Понтекорво в 1949 г. специально изобрел так называемые *пропорциональные счетчики*. Их использование стало одним из главных факторов, определивших успех Дэвиса.

Создание в 50-х годах больших сцинтилляционных детекторов сделало возможным прямое детектирование реакции



вблизи ядерного реактора, от которого благодаря бета-распадам (2) осколков ядерного деления урана (обогащенных нейтронами) исходят именно *антинейтрино*. Это и осуществили в 1956 г. Ф.Райнес, Нобелевский лауреат 1988 г., и К.Коуэн, что стало первой экспериментальной регистрацией антинейтрино (хотя в первой публикации авторы ошибочно занизили вдвое вероятность взаимодействия нейтрино с протонами).

Следует отметить, что реакции (1) и (4) являются обратными по отношению к бета-распаду (2) и должны обязательно осуществляться при достаточной для них энергии, тогда как реакция $\bar{\nu}_e + n \rightarrow$

$p + e^-$ и, следовательно, $\bar{\nu}_e + ^{37}\text{Cl} \rightarrow$

$^{37}\text{Ar} + e^-$ могут происходить на реакторных антинейтрино только в случае, если антинейтрино тождественно совпадают с нейтрино.

В отличие от реактора, Солнце — мощный источник не *антинейтрино*, а *нейтрино*, поскольку в центральных областях нашего светила вследствие цепочки различных ядерных реакций происходит синтез гелия:



Последняя реакция, в которой выделяется энергия $Q \approx 26.7$ МэВ,

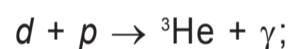
и есть источник солнечной энергии. С величиной Q напрямую связан полный поток солнечных нейтрино на Земле (он равен удвоенному отношению солнечной постоянной $q \approx$



Р.Дэвис

$\approx 8.53 \cdot 10^{11}$ МэВ·см⁻²·с⁻¹ к энергии Q и составляет $\sim 6 \cdot 10^{10}$ см⁻²·с⁻¹).

В начале 50-х годов считалось, что процесс (5) осуществляется в основном за счет так называемого *pp*-цикла с образованием на промежуточных стадиях ядер дейтерия (d) и ^3He :



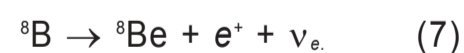
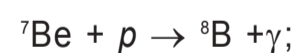
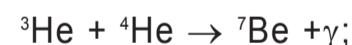
При этом максимальная энергия излучаемого нейтрино составляет 0.4 МэВ и оно оказывается недоступным для регистрации хлор-аргонным методом (поскольку энергетический порог реакции (3) — 0.814 МэВ). Правда, была возможность того, что синтез (5) частично идет за счет известного CNO-цикла, предложенного Г.Бете, когда на промежуточных этапах образуются ядра ^{13}N и ^{15}O , испускающие нейтрино с максимальными энергиями 1.2 и 1.7 МэВ. Однако при солнечных температурах вклад CNO-цикла в энергетику Солнца предполагался незначительным, и поэтому на первую установку Дэвиса, содержащую 3875 л жидкого перхлорэтилена (C_2Cl_4), не возлагали особых надежд в плане детектирования солнечных нейтрино. Тем не менее создание и испытание ее



М.Кошиба

вблизи атомного реактора в 1956 г. привело к важному физическому результату: было доказано, что на реакторных антинейтрино реакция (3) не происходит, в то время как в опытах Райнеса и Коуэна наблюдается реакция (4). Тем самым *впервые* было экспериментально доказано, что антинейтрино отличается от нейтрино.

В 1958 г. произошло событие, имевшее решающее значение для постановки опытов по регистрации солнечных нейтрино. Выяснилось, что вероятность ядерных реакций между ядрами ^3He и ^4He примерно в 1000 раз больше, чем предполагалось ранее. В.Фаулер и А.Каммерон сразу же обратили внимание Дэвиса на этот результат, указав, что в цепочке реакций *pp*-цикла может быть ответвление:



При распаде образующихся в нем ядер бора-8 возникают нейтрино с максимальной энергией 15 МэВ (доступные для регистрации хлор-аргонным методом, хотя доля реакций (7) с образованием ^8B составляет в *pp*-цикле лишь 0.02%). Первоначальные теоретические оценки потока «борных» нейтрино из-за недостаточности точного знания веро-

яностей ядерных реакций в цепочке (6)—(7) (а также реакции $e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$, конкурирующей с обра-

зованием ядер ${}^8\text{B}$) оказались в несколько раз завышенными. Это, однако, сыграло счастливую роль, способствовав финансированию эксперимента Дэвиса.

Установка Дэвиса, содержащая $3.785 \cdot 10^5$ л (615 т) жидкого C_2Cl_4 , была размещена в золоторудной шахте Хоумстейк на глубине 1455 м для защиты от фона, создаваемого космическими лучами (данные о космическом фоне под землей были предоставлены Г.Т.Зацепиным и О.Г.Ряжской). Первые результаты эксперимента, опубликованные в 1968 г., показали, что скорость реакции (3) не превышает трех *солнечных нейтринных единиц* — SNU (единица SNU, предложенная Дж.Бакалом, соответствует одному акту взаимодействия в секунду, приходящемуся на 10^{36} атомов мишени). С 1971 г. установка Дэвиса начала регистрировать реакцию (3), происходящую под воздействием солнечных нейтрино. Эксперименты, продолжавшиеся 30 лет, показали, что скорость реакции составляет в среднем 2.5 SNU: при наличии в установке $2 \cdot 10^{30}$ ядер ${}^{37}\text{Cl}$ она соответствует скорости генерации в мишени одного атома ${}^{37}\text{Ar}$ примерно за двое суток (или регистрации одного акта распада ${}^{37}\text{Ar}$ за одну-две недели). Полученное значение оказалось приблизительно в три раза меньше, чем предсказывала теория на основе Стандартной модели Солнца после уточнения ядерных констант. Тщательные контрольные измерения, в том числе прямые измерения эффективности извлечения радиоактивных атомов ${}^{37}\text{Ar}$ из мишени (которая оказалась практически равной 100%), уменьшение числа фоновых событий (до четырех событий в год!) не изменили полученных экспериментальных данных.

Они были подтверждены в другом независимом эксперименте на установке Камиоканде-2, проведенном японскими физиками во главе с Кошибой. Этот эксперимент был основан на прямой регистрации нейтрино по его рассея-

нию на электронах мишени:



В качестве мишени использовалась вода общим весом 3000 т. Для регистрации солнечных нейтрино служили 680 т воды во внутренней части резервуара. Электроны, получившие достаточно большую энергию (>7 МэВ) в результате процесса (8), регистрировались по их черенковскому излучению большими фотоумножителями на стенках резервуара. Установка была размещена под землей, в металлорудной шахте Камиока вблизи Токио, на глубине 1000 м. Непосредственная регистрация нейтринных событий имела ряд достоинств: во-первых, направление вылета электронов доказывало, что объект, вызывающий их появление, летит от Солнца; во-вторых, по спектру энергии электронов можно было сделать заключение о спектре испускаемых нейтрино; в-третьих, принципиальное значение имела временная привязка событий. Последнее сыграло важную роль при регистрации нейтринного потока, возникшего от вспышки сверхновой в 1987 г. в Большом Магеллановом Облаке, на расстоянии приблизительно 150 000 св. лет от Земли. Поток нейтрино оказался скоррелирован по времени со вспышкой сверхновой и наблюдался в течение 12 с, когда было зарегистрировано 12 событий с энергиями электронов от 7 до 35 МэВ. (Одновременно этот поток был зарегистрирован на установке IMB в соляной шахте в штате Огайо и на Баксанской нейтринной обсерватории, но, к сожалению, часы всех трех лабораторий не были достаточно точно синхронизированы). Регистрация нейтрино от сверхновой 1987 г. подтвердила основные теоретические представления о механизме вспышки и позволила установить ряд ограничений на характеристики нейтрино (его массу, магнитный момент и др.).

Возвращаясь к детектированию солнечных нейтрино, необходимо сказать, что оба эксперимента имели фундаментальное значение,

доказав, с одной стороны, термоядерную природу солнечной энергии и поставив, с другой стороны, проблему дефицита в потоке солнечных электронных нейтрино. Решение этой загадки, наметившееся в последние два года, само по себе представляет открытие исключительной важности. Обнаруженный дефицит солнечных нейтрино мог быть связан как с несовершенством наших представлений о строении Солнца, так и с особыми свойствами нейтрино. Все это породило множество гипотез и потребовало дальнейших экспериментальных исследований.

На пути разрешения проблемы важное значение имел галлиево-германиевый радиохимический эксперимент, предложенный В.А.Кузьминым. Благодаря тому что реакция



с образованием радиоактивного ядра ${}^{71}\text{Ge}$ имеет низкий энергетический порог (0.233 МэВ), она оказывается доступной для детектирования основного потока солнечных нейтрино от реакции $p + p \rightarrow d$

+ $e^+ + \nu_e$. Совместный российско-американский эксперимент SAGE, проведенный под руководством Г.Т.Зацепина и В.Н.Гаврина с использованием 60 т галлия, а также эксперимент GALLEX европейской коллаборации в лаборатории Гран-Сассо (Италия) на 30 тоннах галлия доказали, что дефицит солнечных электронных нейтрино имеет место и для основного потока нейтрино. Тем самым было доказано, что дефицит не связан с моделью Солнца (поскольку полный поток нейтрино определяется только энергией Солнца). Поэтому причину дефицита солнечных нейтрино следовало искать в свойствах самого нейтрино. Здесь также было высказано много гипотез, включая возможность распада самого нейтрино на его пути от Солнца, наличие магнитного момента нейтрино и т.д. Однако наиболее привлекательной представлялась гипотеза *осцилляций* нейтрино, а именно

возможность процесса, при котором электронное нейтрино периодически переходит в нейтрино других типов и обратно. Предположение об осцилляции нейтрино—антинейтрино впервые высказал Понтекорво в 1957 г., сразу после упомянутых экспериментов Дэвиса 1956 г. на реакторных антинейтрино (когда еще предполагалось существование только одного типа нейтрино и его антинейтрино).

После экспериментов 1962 г., доказавших, что мюонное нейтрино, испускаемое, например, в процессе $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$, отличается от

электронного нейтрино*, естественно возникли идеи о возможности смешивания между этими типами нейтрино (такие идеи высказывали японские физики — М.Накагава, Хоконоги, С.Таката и А.Тойода в 1963 г.). В 1967 г. Понтекорво указал, что осцилляции ν_e и ν_μ могут

вдвое уменьшить ожидаемый в опытах Дэвиса поток солнечных нейтрино, поскольку мюонное нейтрино не обладает энергией, достаточной для протекания реакции $\nu_\mu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow \mu^- + {}^{37}\text{Ar}$. В 1969 г.

в работе «Нейтринная астрономия и лептонный заряд» Понтекорво (совместно с В.Н.Грибовым) предложил простейшую (наиболее «экономную») теорию осцилляций ν_e и ν_μ . Позже он отметил, что при

наличии N поколений лептонов и осцилляций между ними скорость образования ${}^{37}\text{Ar}$ может уменьшиться в N раз. Таким образом, после открытия третьего лептона (τ -лептона) и соответствующего ему тау-нейтрино (ν_τ) можно

было ожидать, что поток электронных нейтрино при максимальном смешивании уменьшится в три раза.

* За это открытие были удостоены Нобелевской премии (1995) авторы эксперимента Л.Ледерман, Дж. Штейнбергер и М.Шварц. Следует отметить, что на возможность экспериментального решения вопроса о различии электронного и мюонного нейтрино первым указал Понтекорво.

Экспериментально проверить указанную гипотезу можно благодаря тому, что, согласно единой теории электрослабых взаимодействий, мюонное и тау-нейтрино должны специфическим образом взаимодействовать с веществом мишени посредством так называемых *нейтральных токов*. Данное взаимодействие нейтрино с электронами и нуклонами атомных ядер происходит через нейтральный Z^0 -бозон и должно приводить к рассеянию ν_μ и ν_τ на электронах

и нуклонах с передачей им некоторой доли своей энергии. При этом, правда, вероятность взаимодействия таких нейтрино с электронами примерно в шесть-семь раз меньше, чем для ν_e , так как последнее

может взаимодействовать с электронами не только посредством нейтрального, но и заряженного тока через заряженный W^- -бозон: $\nu_e + e^- \rightarrow W^- \rightarrow \nu_e + e^-$. В силу этой

малости вклад ν_μ и ν_τ в процесс (8)

при сравнительно небольшом числе зарегистрированных актов реакции было трудно с уверенностью выделить, хотя уже в установке Камиоканде-2 было замечено, что дефицит в потоке солнечных нейтрино, наблюдаемый в процессе (8), несколько меньше, чем в хлор-аргонном эксперименте. Намного точнее данный факт удалось подтвердить в опытах на установке СуперКамиоканде, где гигантская водяная мишень была заключена в цилиндр с диаметром и высотой около 40 м. Решающими же стали эксперименты на канадской установке SNO (Нейтринная обсерватория Садбери), где мишенью служили 1000 т тяжелой воды. На этой установке можно было *одновременно* наблюдать: процессы, вызываемые только заряженными токами ($\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$); про-

цессы, вызываемые только нейтральными токами ($\nu + d \rightarrow p + n$

+ ν); процесс (8), вызываемый

нейтральными токами в случае $\nu = \nu_\mu$ и $\nu = \nu_\tau$ и смесью заряженных и нейтральных токов в случае $\nu = \nu_e$. При этом, используя частично

результаты СуперКамиоканде, удалось выделить в процессах с нейтральными токами вклад нейтрино ν_μ и ν_τ . Оказалось, что при

учете этого вклада общее число испущенных солнечных электронных нейтрино (частично перешедших в ν_μ и ν_τ) хорошо согласуется

со Стандартной моделью Солнца.

Таким образом, представляется, что загадка солнечных нейтрино наконец решена (хотя выводы требуют, разумеется, дальнейшей всесторонней проверки). Этот факт имеет важное значение для подтверждения существующих представлений об эволюции звезд, включая вспышки сверхновых. Но еще более фундаментально обнаружение осцилляций нейтрино, которое, несомненно, приведет к новым гипотезам и открытиям.

Детектирование солнечных нейтрино и нейтрино от вспышки сверхновой 1987 г. заложило основы нового плодотворного направления — *нейтринной астрономии*. Приветствуя заслуженное присуждение Нобелевской премии Рэймонду Дэвису младшему и Масатоши Кошибе за их открытия, вместе с тем испытываешь глубокое сожаление, что скончавшийся в 1993 г. Бруно Максимович Понтекорво, сделавший столь много для физики нейтрино вообще, и для детектирования солнечных нейтрино в частности, не смог разделить эту награду ■.

© Член-корреспондент РАН
С.С.Герштейн,

Институт физики высоких энергий
Протвино

Нобелевская премия по физике за 2002 г. присуждена также американскому ученому итальянского происхождения Риккардо Джиаккони (Riccardo Giacconi) «за пионерские изыскания в области астрофизики, приведшие к открытию космических источников рентгеновского излучения». Лауреат родился в 1931 г. в Генуе, защитил диссертацию в 1954 г. в Миланском университете. Впоследствии он работал в НАСА, был директором Института Космического телескопа им. Э. Хаббла, директором Европейской южной обсерватории. В настоящее время — президент Ассоциации университетов (Вашингтон, США). Его награждением отмечено еще одно из великих астрономических открытий, совершенных в 60—70-х годах ушедшего XX века.

Рентгеновское излучение, которое условно разделяют на мягкое (с энергиями фотонов от 50 эВ до 1 кэВ), среднее (оно же — классическое, 1—20 кэВ) и жесткое (20—500 кэВ), очень эффективно поглощается земной атмосферой, поэтому исследования неба в этой части электромагнитного спектра стали возможными лишь с появлением ракет. Первым объектом для таких исследований послужила корона нашего Солнца. В оптических лучах ее можно хорошо наблюдать в редкие моменты полных солнечных затмений. В конце 40-х годов в США благодаря успешным пускам ракет с соответствующей приемной аппаратурой было открыто рентгеновское излучение сильно разреженного коронального газа, нагретого до температуры порядка $1\text{--}2 \cdot 10^6$ К. Напомним, что температура видимой в оптических лучах поверхности Солнца (солнечной фотосферы) — около $6 \cdot 10^3$ К, и она не может обеспечить вклад в регистрируемый рентгеновский поток.

Как было обнаружено позже, рентгеновские изображения солнечной короны имеют сложную, переменную во времени структуру, наблюдательные проявления которой скоррелированы с 11-летним циклом активности Солнца. Необычайно красивы и зрелищны «фо-

тографии» короны в рентгеновских лучах. Не будем здесь обсуждать естественно возникающий вопрос о механизме нагрева ее вещества до столь высоких температур, тем более, что этот механизм пока полностью не выяснен. Отметим лишь то, что наличие у нашего светила горячей короны однозначно связано с существованием мощной зоны, где тепловая энергия из его недр выносится наружу конвективными движениями вещества. Большую роль в формировании наблюдаемых сложных корональных структур играют магнитные поля.

Рентгеновская светимость короны хотя и сильно варьирует, но в среднем составляет всего лишь одну миллионную часть оптической светимости Солнца. Поэтому в те далекие 40-е годы вопрос обнаружения горячих корон даже у самых близких звезд, находящихся на расстоянии порядка нескольких парсек от Солнечной системы, не стоял.

Исторически сложилось так, что следующим объектом для исследований в рентгеновском диапазоне была запланирована Луна. 18 июня 1962 г. небольшой коллектив ученых, состоящий из (тогда еще молодого) лауреата Нобелевской премии, его учителя — патриарха рентгеновской астрономии — Б.Росси, а также их коллег Г.Гурского и Ф.Паolini, реализовал ракетный проект, целью которого было зарегистрировать флуоресцентное рентгеновское излучение лунной поверхности, возбуждаемое фотонами и/или потоками заряженных частиц, которые идут от Солнца. Излучения от Луны обнаружено не было, однако, как это иногда случается в науке, результатом стало «незапланированное» открытие довольно яркого рентгеновского источника, находящегося за пределами Солнечной системы в направлении на созвездие Скорпиона (Sco-X-1). Пройдет еще несколько лет, и в начале 70-х годов работа специализированного рентгеновского спутника «Uhuru» докажет, что с этим источником в нашу жизнь ворвались принципиально новые космические объекты — *аккрецирующие нейтронные звезды*

и черные дыры в двойных звездных системах. А рентгеновское излучение лунной поверхности будет открыто позже (29 июня 1990 г.) с борта другого, более совершенного рентгеновского спутника «ROSAT».

Но пока вернемся в 60-е годы. При первом же запуске был обнаружен рентгеновский фон, изотропно распределенный по небу. В дальнейшем разные группы ученых (в основном из США) с помощью ракет, поднимавшихся на высоту 200 км, открыли несколько десятков космических источников рентгеновского излучения в классическом диапазоне энергий. В более жестком диапазоне наблюдения выполнялись и с помощью аппаратуры, установленной на гондолах высотных (до 40 км) аэростатов. Небольшая часть открытых источников была отождествлена с уже известными объектами на небе. Это прежде всего находящаяся в созвездии Тельца Крабовидная туманность и некоторые другие остатки сверхновых в нашей Галактике. Мощными генераторами рентгеновского излучения оказались необычно сильно излучающая в радиодиапазоне галактика NGC 5128 (Cen A), яркий в оптических лучах квазар 3C 273. Был зарегистрирован заметный поток рентгеновского излучения в направлении на скопление галактик в созвездии Девы.

Однако природа большей части рентгеновских космических источников (в том числе и самого первого Sco-X-1) некоторое время оставалась загадочной. Стало ясно, что для дальнейшего продвижения требуется создание специальных искусственных спутников Земли, оснащенных рентгеновским оборудованием. В США при НАСА для этих целей организуется научная фирма «American Science and Ingeenering Inc». Работы по созданию таких спутников в этой фирме и возглавил Джиаккони. Первый спутник был запущен 12 декабря 1970 г. с итальянской платформы Сан-Марко, плавающей у берегов Кении, на почти круговую орбиту с высотой около 550 км. День запуска совпал с днем празднования независимости Кении; в честь это-

го события спутник назвали «Ухуру» («Uhuru»), что на языке суахили означает «Свобода». Спутник работал до конца 1973 г., и результаты оказались поистине феноменальными. Прежде всего на порядок возросло число известных космических рентгеновских источников — в заключительном каталоге «Uhuru» их содержится уже 339. Появилась рентгеновская карта неба, которая показала, что наиболее яркие источники концентрируются в направлении к галактической плоскости и к области галактического центра. Но самое важное открытие состояло в том, что около десятка таких объектов оказались компонентами *двойных звездных систем*.

Методами оптической наземной астрономии было обнаружено, что соседними компонентами у этих источников являются обычные звезды, интенсивно теряющие вещество со своей поверхности. Типичные значения периодов орбитального обращения двойных рентгеновских систем — несколько земных суток. Среди этих источников встречаются как рентгеновские пульсары с периодами следования импульсов от долей секунды до нескольких сот секунд, так и объекты, в потоке рентгеновского излучения которых периодическая компонента отсутствует. Рентгеновские источники в этих системах оказались очень компактными телами с характерными размерами излучающих областей не больше нескольких десятков километров. Вместе с тем из анализа динамики вращения двойных систем был сделан вывод, что значения масс компактных объектов — порядка массы Солнца M_{\odot} и больше. Единственно возможными кандидатами на их место оказались нейтронные звезды и черные дыры, мощное рентгеновское свечение которых вызвано процессом дисковой аккреции на них вещества, утерянного соседней обычной звездой.

В двойной системе вещество, истекающее из нормальной звезды и падающее на компактный объект, имеет относительно последнего угловой момент, который препятствует падению вещества вдоль пря-

мой. Вокруг компактного объекта формируется аккреционный диск. В первом приближении вещество такого диска вращается по круговым кеплеровым орбитам. При наличии эффективной вязкости, которая обусловлена турбулентностью и/или магнитными полями, в дифференциально вращающемся кеплеровском диске начинается процесс перераспределения углового момента между соседними слоями, который приводит к медленному продвижению вещества по радиусу диска к тяготеющему центру. При этом выделяется гравитационная энергия; часть ее и испускается с поверхности диска в виде электромагнитного излучения. Его свойства прежде всего зависят от скорости аккреции — темпа поступления вещества в диск с поверхности соседней звезды. Расчеты показывают, что количество выделяемой в диске энергии растет по мере приближения к компактному объекту. Внутренние части аккреционных дисков вокруг черных дыр разогреваются до температур в десятки (а то и сотни) миллионов градусов. При таких температурах практически вся выделяемая энергия приходится на рентгеновский диапазон. Непосредственно вблизи черных дыр гравитационное поле становится настолько сильным, что вещество в этой области начинает падать чрезвычайно быстро, не успевая выделить заметную энергию.

Для удаленного наблюдателя аккреционные диски и вокруг нейтронных звезд, не обладающих сильными магнитными полями, и вокруг черных дыр проявляются схожим образом. Однако вблизи поверхности подобных нейтронных звезд образуется пограничный слой, в котором выделяется дополнительная энергия. У черных дыр такой поверхности нет! С другой стороны, масса нейтронной звезды не может быть больше некоторого критического значения ($\sim 3M_{\odot}$), поэтому уверенно отождествить аккрецирующие черные дыры удается в тех системах, где есть шанс определить массу компонентов. Первым кандидатом в черные дыры оказался яркий рентгеновский



Р.Джиаккони

источник в созвездии Лебедя (Суг X-1), в потоке рентгеновского излучения которого отсутствует строго периодическая компонента. Его масса оценивается в $10M_{\odot}$. К настоящему времени известно более десятка аккрецирующих черных дыр в двойных рентгеновских системах с надежно определенными массами. А вот первый, открытый в созвездии Скорпиона, источник Sco X-1 оказался слабо замагниченной аккрецирующей нейтронной звездой.

Если аккрецирующая нейтронная звезда обладает сильным магнитным полем (10^{10} — 10^{12} Гс), это поле разрушает аккреционный диск на достаточном удалении от ее поверхности. Далее вещество начинает падать на нейтронную звезду вдоль магнитных силовых линий и встречается с ее поверхностью вблизи магнитных полюсов. Именно там и происходит выделение гравитационной энергии, большей частью в рентгеновском диапазоне. При наличии вращения такая нейтронная звезда будет наблюдаться как рентгеновский пульсар с периодом следования импульсов, равным периоду вращения или половине этого периода (в зависимости от ориентации оси вращения пульсара относительно наблюдателя). Первые детально изученные рентгеновские пульсары, которые представляют собой аккрецирующие нейтронные звез-

ды с сильным магнитным полем из двойных систем, были открыты с борта «Uhuu» в созвездиях Геркулес (Her X-1) и Кентавр (Cen X-3). В настоящее время число известных нейтронных звезд, проявляющих себя как аккрецирующие рентгеновские источники в двойных системах, исчисляется десятками.

Наряду с белыми карликами, открытыми еще в начале XX в., нейтронные звезды и черные дыры представляют собой конечные продукты звездной эволюции. Вращающиеся нейтронные звезды были обнаружены как источники строго периодического радиоизлучения с периодами следования импульсов порядка нескольких секунд в 1967 г. группой английских ученых, возглавляемой Э.Хьюишем (за четыре года до полета «Uhuu»). Эти радиопульсары оказались нейтронными звездами с сильным магнитным полем (10^{10} — 10^{12} Гс). У данных объектов наблюдается вековое замедление следования импульсов, т.е. уменьшение их угловой скорости вращения и соответственно уменьшение их вращательной кинетической энергии. Именно эта энергия и есть резервуар наблюдаемой активности нейтронных звезд-радиопульсаров. Те же нейтронные звезды ведут себя как аккрецирующие рентгеновские пульсары, если на их поверхность выпадает вещество. В этом случае источником наблюдаемой активности становится выделение гравитационной энергии падающего вещества. Обычно светимость аккрецирующих пульсаров в сотни тысяч, миллионы раз больше, чем светимость радиопульсаров.

За прошедшие 30 лет с момента запуска на околоземную орбиту

спутника «Uhuu» реализованы десятки новых проектов для исследования неба в рентгеновском диапазоне, во многих из которых принимал участие Джааккони. Например, для Рентгеновской обсерватории им.А.Эйнштейна он сконструировал специальный телескоп с зеркалами косоугольного падения, позволяющий не просто регистрировать рентгеновское излучение, а получать изображение источника. В ходе выполнения многочисленных наблюдений открыты сотни тысяч новых источников самой различной природы. Были зафиксированы горячие короны у других звезд. Благодаря рентгеновскому свечению аккреционных дисков обнаружены сверхмассивные черные дыры в ядрах активных галактик и квазарах. Особо следует отметить реализованный в 90-х годах в России проект «Гранат» (научный руководитель — академик РАН Р.А.Сюняев), который, в частности, положил начало исследованию микроквazarов, т.е. компактных рентгеновских источников в нашей Галактике с мощными релятивистскими джетами, излучающими преимущественно в радиодиапазоне.

Сейчас на околоземных орбитах успешно работают крупные рентгеновские обсерватории «Chandra» (чей запуск был инициирован лауреатом), «XMM-Newton», «RXTE», «НЕТЕ-2». 17 октября 2002 г. на эллиптическую (с апогеем ~150 000 км) орбиту вокруг Земли российской ракетой «Протон» была выведена еще одна обсерватория «INTEGRAL» — для исследования неба в жестком рентгеновском диапазоне и гамма-лучах. Несомненно, что 30 лет назад рентгеновский спутник «Uhuu» открыл новую эру в изучении окружа-

ющего нас космического мира, и Риккардо Джааккони был здесь первопроходцем. ■

© Н.И.Шакура,

доктор физико-математических наук

Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга
Москва