

НЕЙТРИННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ НОВОРОЖДЕННОГО ПУЛЬСАРА

А. В. КУЗНЕЦОВ

Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

NEUTRINO ROCKET ENGINE OF A NEW-BORN PULSAR

A. V. KUZNETSOV

The high peculiar velocities of pulsars represent an unsolved problem of astrophysics. A scenario, when the pulsar (the neutron star) burning in a supernova explosion receives a gigantic blow due to asymmetry in the neutrino emission is considered. This could be a large scale manifestation of the parity violation being inherent in weak interactions of elementary particles.

Большие собственные скорости пульсаров представляют собой одну из нерешенных проблем астрофизики. В статье рассматривается один из сценариев, по-видимому наиболее привлекательный с физической точки зрения, когда пульсар, нейтронная звезда, рождающаяся при взрыве сверхновой, получает в этот момент гигантский толчок за счет асимметричного вылета нейтрино. Возможно, это является крупномасштабной демонстрацией несохранения четности в слабых взаимодействиях элементарных частиц.

www.issep.rssi.ru

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы, рассматриваемые в данной статье, относятся к довольно молодой и бурно развивающейся области науки на стыке физики элементарных частиц и астрофизики. Ее английское название — *Astroparticle Physics* (такой международный журнал издается уже несколько лет¹), — к сожалению, не имеет лаконичного русского эквивалента. По-видимому, предысторию этой науки можно отсчитывать от того момента, когда открытие Дж. Чедвиком в 1932 году новой элементарной частицы — нейтрона позволило астрофизику Ф. Цвики (F. Zwicky) вскоре сформулировать идею нейтронной звезды. Этот экзотический объект, по мысли Цвики, должен рождаться на конечной стадии эволюции массивной звезды, когда силы гравитации за несколько секунд сжимают ее центральную область с массой порядка солнечной до ничтожных по звездным меркам размеров около 10 км — происходит гравитационное схлопывание, или гравитационный коллапс. При этом плотность вещества в центре достигает значений ядерной плотности, а это невообразимая по нашим меркам величина — 1 миллион тонн на 1 кубический миллиметр. Силы сжатия таковы, что электроны как бы вдавливаются в протоны и образуются нейтроны — рождается нейтронная звезда. При этом оболочка звезды-родителя разбрасывается в разные стороны с огромными скоростями — происходит взрыв, так что яркость возрастает в миллиарды раз. Вспыхивает сверхновая звезда.

В течение многих лет астрономы скептически относились к идее нейтронной звезды. Лишь открытие в 1967 году пульсаров позволило установить истину. На небе были обнаружены совершенно необычные радиоисточники, которые излучали кратковременные радиоимпульсы со строгой периодичностью. Сначала они были всерьез приняты за сигналы братьев по разуму и даже засекречены. В настоящее время известны сотни

¹ Его страница в Интернете:

<http://www.elsevier.nl/locate/astropart>

пульсаров. Большинство из них являются радиопульсарами, но есть и такие, что излучают в рентгеновском диапазоне. По существующим понятиям это нейтронные звезды, вращающиеся с очень большой скоростью, у которых магнитные полюсы не лежат на оси вращения. Магнитные поля на поверхности нейтронных звезд так велики, что канализируют электромагнитное излучение, и звезда может излучать только в два узких конуса около ее магнитных полюсов. При вращении звезды лучи этих двух прожекторов, как лучи маяка, также вращаются внутри конических слоев. Если Земля находится внутри такого слоя, мы наблюдаем эту нейтронную звезду как пульсар.

Одной из загадок нейтронных звезд являются аномально большие пространственные скорости некоторых из них. Впервые предположение о собственных движениях пульсаров выдвинул в 1969 году советский астрофизик И.С. Шкловский, чтобы объяснить закономерности в наблюдаемом изменении их периодов. Он же отметил, что наиболее вероятной причиной толчка, получаемого пульсаром, является асимметрия вылета оболочки при взрыве.

В настоящее время исследована группа из ~100 пульсаров, для которых скорости составляют в среднем 450 км/с, достигая максимального значения около 1500 км/с. Существует несколько гипотез, более или менее удовлетворительно объясняющих указанную выше асимметрию, дающую толчок нейтронной звезде. Речь пойдет об одной из гипотез, возможно наиболее привлекательной с физической точки зрения. Но сначала необходимо рассмотреть некоторые вопросы физики элементарных частиц, и прежде всего физики нейтрино.

НЕЙТРИНО И ЕГО РОЛЬ В АСТРОФИЗИКЕ

Нейтрино, по мнению большинства ученых, самая загадочная из элементарных частиц, и, возможно, самая главная частица во Вселенной, была теоретически предсказана немецким физиком Вольфгангом Паули в 1930 году. Известна фраза, которую Паули при этом произнес: “Я сегодня сделал что-то ужасное. Физику-теоретику никогда не следует делать такого. То, что я предположил, никогда нельзя будет проверить экспериментально”. Потребовалось почти два с половиной десятилетия для того, чтобы разработать и осуществить эксперимент по обнаружению нейтрино, своеобразного призрака микромира, частицы, очень слабо взаимодействующей с веществом и поэтому почти неуловимой. Однако прошло еще 40 лет, и положение кардинально изменилось. Современная физика нейтрино — это, с одной стороны, интенсивные нейтринные пучки, создаваемые на ускорителях элементарных частиц, с другой — несколько разновидностей нейтринных детекто-

ров. Среди них наиболее впечатляющими являются нейтринные телескопы, расположенные под землей, под водой и даже подо льдом Антарктиды.

Одна из причин повышенного интереса физиков к нейтрино — важнейшая роль, которую играет эта частица в процессах, происходящих внутри звезд. Среди всех событий, происходящих во Вселенной, грандиознейшими являются уже упоминавшиеся взрывы сверхновых. Теоретические расчеты показывают, что видимое свечение такой звезды составляет только 0,01% всей выделяющейся при взрыве энергии, 0,99% — кинетическая энергия разлетающейся оболочки, а 99% уносят нейтрино. Эти расчеты были подтверждены экспериментально, когда при взрыве Сверхновой 1987 года подземные нейтринные телескопы в Японии, США, России и Италии впервые зарегистрировали несколько десятков нейтрино от этой звезды, расположенной в другой галактике.

Огромная проникающая способность нейтрино обусловлена тем, что оно участвует только в слабом взаимодействии (не считая гравитационного, влияние которого на процессы с элементарными частицами пренебрежимо мало). Отличительной особенностью слабого взаимодействия является зеркальная асимметрия — если какой-либо процесс, вызванный слабым взаимодействием, отразить в зеркале, то, что мы там увидим, вообще говоря, не происходит в реальном мире. В то же время все другие процессы с элементарными частицами, вызванные сильными или электромагнитными взаимодействиями, зеркально симметричны.

ЗЕРКАЛЬНАЯ СИММЕТРИЯ КАК ЗАКОН СОХРАНЕНИЯ ЧЕТНОСТИ

В микромире, где все подчиняется законам квантовой механики, понятие зеркальной симметрии требует уточнения. Здесь оно формулируется в виде закона сохранения четности. Состояние микрочастицы описывается в квантовой теории волновой функцией $\psi(x, y, z)$. Квадрат модуля $|\psi(x, y, z)|^2$ определяет вероятность того, что частица имеет координаты x, y, z . Четность микрочастицы связана с законом преобразования волновой функции при зеркальном отражении.

Если зеркало поместить в плоскости xOy , в отраженной волновой функции координата z изменит знак. На языке квантовой механики это описывается как действие оператора отражения P_z на волновую функцию

$$P_z \psi(x, y, z) = \psi(x, y, -z).$$

Это преобразование эквивалентно отражению всех трех осей координат — пространственной инверсии

$$P_x P_y P_z \psi(x, y, z) = P_z \psi(x, y, z) = \psi(-x, -y, -z),$$

поскольку отличается от него лишь поворотом вокруг оси z на угол π .

Существует доказательство того, что волновая функция физической системы, на которую не действуют внешние силы, является собственной функцией оператора инверсии P_i , то есть действие оператора на функцию сводится к ее умножению на некоторое число a — собственное значение

$$P_i \psi(x, y, z) = \psi(-x, -y, -z) = a \psi(x, y, z).$$

Если провести инверсию дважды, мы вернемся к исходным координатам, но перед функцией возникает множитель a^2 :

$$P_i P_i \psi(x, y, z) = \psi(x, y, z) = a^2 \psi(x, y, z).$$

Следовательно, $a^2 = 1$, или $a = \pm 1$. Волновая функция микрочастицы либо вообще не изменится при инверсии ($a = +1$), либо изменит знак ($a = -1$). Величина a называется четностью или внутренней четностью частицы. Если в систему входит несколько частиц, то их полная четность равна произведению (а не сумме) четностей каждой из частиц.

В течение десятилетий, до 1956 года, считали, что законы природы в микромире зеркально симметричны. Это означает, что величина, описывающая взаимодействие микрочастиц, — функция Лагранжа или лагранжиан, — в которую входит произведение волновых функций, должна быть скалярной величиной, то есть не должна изменяться как при любых поворотах системы координат, так и при отражении в зеркале (инверсии). Псевдоскалярной называется величина, не меняющаяся при поворотах системы координат, но меняющая знак при инверсии. Здесь уместно упомянуть еще о двух типах физических величин, которые тоже ведут себя одинаково при поворотах системы координат, но по-разному при инверсии и отражении. Это векторы и псевдовекторы (аксиальные векторы).

Проекции вектора и псевдовектора на оси координат при поворотах преобразуются по одним и тем же законам. При инверсии же любой вектор ведет себя так же, как и радиус-вектор (очевидно, что преобразование инверсии можно записать как $\mathbf{r} \rightarrow -\mathbf{r}$), то есть все его проекции меняют знак. А вот проекции псевдовектора при инверсии не меняют знака. Более наглядно различие вектора и псевдовектора можно проиллюстрировать при отражении одной из осей координат. На рис. 1 изображено, как отражаются в зеркале вектор скорости $\mathbf{V}$ и псевдовектор угловой скорости $\vec{\omega}$ при движении точки по окружности. Например, при отражении в зеркале, расположенном в плоскости yOz , меняет знак x -проекция вектора

$$\{V_x, V_y, V_z\} \rightarrow \{-V_x, V_y, V_z\}.$$

Проекции псевдовектора преобразуются совершенно иначе:

$$\{\omega_x, \omega_y, \omega_z\} \rightarrow \{\omega_x, -\omega_y, -\omega_z\} = (-1)\{-\omega_x, \omega_y, \omega_z\}.$$

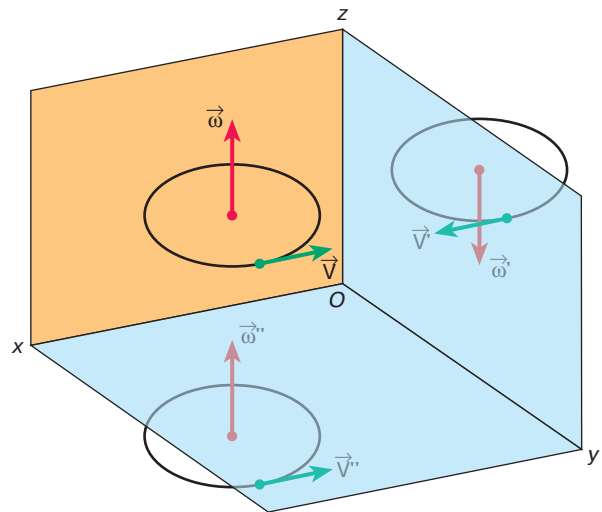


Рис. 1. Различие вектора и псевдовектора при отражении в зеркале

Скалярное произведение вектора и псевдовектора является псевдоскаляром, то есть меняет знак при отражении в зеркале.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗЕРКАЛЬНО СИММЕТРИЧНЫ?

Элементарные частицы являются собой следующий уровень строения материи, более глубокий, чем атомы. Первоначально считалось очевидным, что физические законы в этом мире должны обладать зеркальной симметрией. Теория электромагнитных взаимодействий элементарных частиц — квантовая электродинамика, построенная в 1948–1949 годах в работах Р. Фейнмана, Дж. Швингера и С. Томонаги, имела своей основой лагранжиан взаимодействия в виде произведения трех волновых функций: уничтожаемого электрона, рождаемого электрона (эти функции образуют ток, являющийся вектором) и векторной волновой функции фотона. Наглядно это изображают в виде диаграмм Фейнмана (рис. 2, а), где сплошные линии соответствуют волновым функциям электронов, волнистая линия — волновой функцией фотона. Произведение двух векторов образует скаляр, и зеркальная симметрия электромагнитных взаимодействий обеспечена.

Глубокое сходство с квантовой электродинамикой имеет современная теория слабых взаимодействий элементарных частиц — взаимодействий, которые, в частности, вызывают радиоактивный распад атомных ядер. В элементарном акте слабого взаимодействия уничтожается электрон и рождается электронное нейтрино (рис. 2, б). Их волновые функции образуют ток,

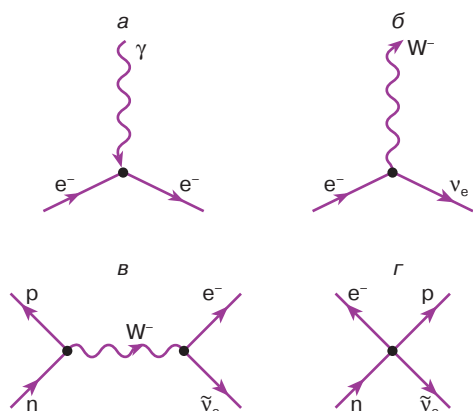


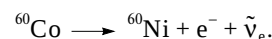
Рис. 2. Диаграммы Фейнмана: а – электромагнитное взаимодействие электрона с фотоном; б – взаимодействие электрона, нейтрино и W-частицы; в – распад нейтрона через виртуальную W-частицу на протон, электрон и антинейтрино; г – распад нейтрона за счет контактного слабого взаимодействия в первоначальной теории Ферми

который, как считалось, должен быть векторным. Ток умножается на векторную волновую функцию заряженной частицы – переносчика слабых взаимодействий, которая называется W-частицей (от англ. weak – слабый). Ввиду ее большой массы W-частица может возникать в слабых распадах частиц, например нейтрона (рис. 2, в), лишь виртуально, то есть на очень короткое время, следующее из квантового соотношения неопределенностей, $\Delta t \sim \hbar / (m_W c^2)$, где $\hbar$ – постоянная Планка, c – скорость света, m_W – масса покоя W-частицы. В процессе на рис. 2, в взаимодействие типа рис. 2, б происходит дважды, и W-частица, рождающаяся в одной точке, где она связана с нейтрон-протонным током, уничтожается в другой точке. В первой теории слабых взаимодействий, построенной Э. Ферми в 1934 году, еще не было виртуальной промежуточной W-частицы, и считалось, что лагранжиан состоит из произведения четырех волновых функций, объединенных в два тока (рис. 2, г). Эти токи считались векторными, что должно было обеспечивать зеркальную симметрию слабых взаимодействий.

НЕСОХРАНЕНИЕ ЧЕТНОСТИ В СЛАБЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯХ

В 1956 году появилась научная статья, которая привела к перевороту в представлениях о свойствах материи на уровне элементарных частиц. Американские теоретики Ц. Ли и Ч. Янг проанализировали всю совокупность экспериментальных данных по слабым процессам и установили, что еще не было проведено опытов, проверяющих, обладают ли слабые взаимодействия зеркальной

симметрией. Они предположили нарушение симметрии, а значит, и несохранение четности и указали эксперименты, в которых можно было бы проверить эту гипотезу. Вскоре такие эксперименты были поставлены. Группа физиков под руководством Ц. Ву исследовала распад ядер кобальта-60, в котором один из нейтронов ядра превращался в протон, так что возникало ядро никеля-60, и испускались электрон и антинейтрино:



Упрощенная схема эксперимента изображена на рис. 3. Ядро кобальта-60, нарисованное в виде шарика, находится в магнитном поле, создаваемом кольцевым электрическим током I . При этом магнитные моменты ядер ориентируются вдоль поля. Стрелками изображено преимущественное направление вылета электронов, составляющее левый винт с направлением тока. Известно, что этот эксперимент, который готовили в течение полугода, длился всего 15 минут – физики сразу убедились, что в распаде кобальта-60 закон сохранения четности нарушается. Отражения этого эксперимента в зеркале, где направление вылета электронов составляет правый винт с направлением тока, в природе не существует! Вскоре были проведены другие эксперименты, однозначно подтвердившие нарушение зеркальной симметрии в слабых взаимодействиях элементарных частиц.

Не будет преувеличением сказать, что это открытие было шоком для физиков. Действительно, до этого момента развитие физики представлялось как движение от сложных явлений к более простой их сущности. Все многообразие механических движений свелось к простым законам Ньютона. Множество электрических, магнитных и оптических явлений имеет в своей основе

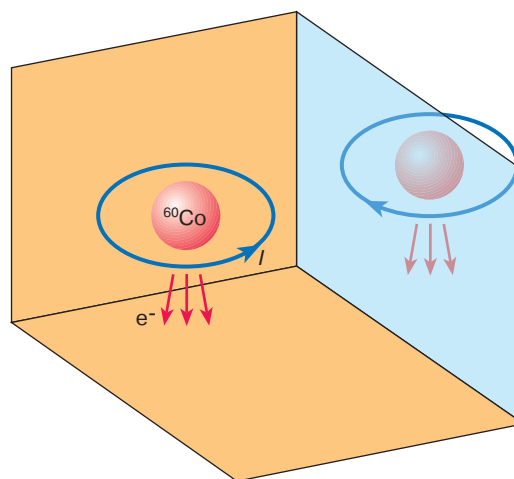


Рис. 3. Распад ядер ${}^{60}\text{Co}$. Отражение этого процесса в зеркале в природе не реализуется!

уравнения электродинамики Максвелла. Разнообразие химических свойств элементов, сгруппированных в сложную Периодическую таблицу Менделеева, объясняется двумя в сущности простыми законами квантовой механики. В мире атомов и простейших молекул имеется зеркальная симметрия. Зачем же при переходе от атомов к более фундаментальному уровню элементарных частиц природе потребовалось отказываться от зеркальной симметрии?

Можно сказать, что проблема несохранения четности лежала для физиков скорее в области философского осмысления законов природы. Вместе с тем формальное математическое описание этого явления было найдено достаточно быстро. Теоретическая модель, обобщившая схему контактного взаимодействия Ферми (рис. 2, а) и находящаяся до сих пор в хорошем согласии с опытом, была построена в 1957–1958 годах в работах Р. Фейнмана и других авторов. Они предложили лагранжиан контактного слабого взаимодействия в виде произведения токов, но не векторных ($V \times V$), как в схеме Ферми, а в виде $(V - A)(V - A)$, то есть для каждой пары частиц (электрона и нейтрино, нейтрона и протона) из волновых функций нужно построить разность векторного и псевдовекторного (аксиального) токов. Этот $(V - A)$ -ток и связан с W -частицей в первичном взаимодействии на рис. 2, б. При низких энергиях хорошо работает более простой, контактный лагранжиан. Такой лагранжиан содержит как скалярные части $V \times V$, $A \times A$, так и псевдоскалярные $V \times A$, $A \times V$. Отсюда неизбежно следует несохранение четности в слабом взаимодействии, то есть нарушение зеркальной симметрии.

НЕЙТРИННЫЙ РЕАКТИВНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Возвращаясь к вопросу о природе толчка, получаемого новорожденным пульсаром, отметим, что было предложено несколько моделей для его описания. Все они объясняют сам факт наличия асимметрии, однако проблема состоит в том, чтобы получить количественные предсказания для скоростей пульсаров. Так, наиболее прямолинейная гидродинамическая модель взрыва сверхновой предполагает, что сам взрыв может быть асимметричным за счет неустойчивости начального состояния. Для получения количественных результатов требуется решить многофакторную задачу трехмерного моделирования, которая пока не под силу даже суперкомпьютеру. Однако, как показала оценка, проведенная в 1995 году астрофизиками из университета Аризоны по упрощенной двумерной схеме, значения скоростей пульсаров масштаба 1000 км/с являются для этой модели весьма проблематичными.

Все остальные модели опираются на два уже упоминавшихся фактора, наверняка присущих взрыву

сверхновой. Это наличие у нейтронных звезд сверхсильных магнитных полей, которые по последним оценкам достигают у наблюдаемых пульсаров значений порядка 10^{11} Тл. Значит, в момент рождения звезды поле было еще больше. Для сравнения: среднее по солнечной поверхности магнитное поле имеет порядок 10^{-4} Тл, в солнечных пятнах оно достигает величины 0,5 Тл. Максимальное значение магнитного поля, полученное в лабораторных условиях в режиме кратковременного импульса, составляет 10^5 Тл.

В одной из ранних моделей, предложенной Харрисоном (E. R. Harrison) и Тадемару (E. Tademaru) в 1975 году, рассматривалась возможность того, что магнитный дипольный момент нейтронной звезды не совпадает с ее центром. При этом звезда будет терять не только энергию за счет канонического магнитно-дипольного излучения, но также и импульс. Получая импульс отдачи, звезда должна двигаться с ускорением в течение сотен лет. Однако для достижения наблюдаемых скоростей необходимы слишком маленькие значения начального периода вращения. Кроме того, в этом случае должны существовать корреляции между направлениями оси вращения и скорости пульсара, которые также не были зафиксированы.

Отметим, что существует и скептический взгляд на возможность взаимосвязи больших магнитных полей и высоких скоростей пульсаров. Дело в том, что в имеющихся данных не обнаружено корреляции между той и другой величиной, группа самых быстрых пульсаров не совпадает с теми, у которых самые большие значения полей. Однако это так называемые старые магнитные поля, которые не позволяют сказать что-либо определенное о величинах полей в момент рождения.

Второй из двух упомянутых факторов — огромная энергия, уносимая нейтрино. По существующим представлениям при взрыве за несколько секунд излучается энергия $E \approx 3 \cdot 10^{46}$ Дж, причем 99% в виде нейтринного излучения. Для сравнения: Солнце при нынешней его светимости излучило бы за 4,6 млрд лет (оцениваемый возраст Солнца) примерно 0,2 % такой энергии.

Абсолютная величина импульса, уносимого нейтринным потоком, может быть найдена по формуле $p = E/c$, так как нейтрино движутся почти со скоростью света. Однако, если нейтрино вылетают во все стороны изотропно, уносимый ими суммарный импульс равен нулю. Если же в нейтринном потоке имеется асимметрия и они уносят импульс порядка 1% от величины p , то в соответствии с законом сохранения такой же импульс получит и звездный остаток — нейтронная звезда. Подставляя в формулу $p = mV$ типичную массу такой звезды, примерно равную массе Солнца, получим $V \approx 500$ км/с. Учитывая, что должен существовать некоторый статистический разброс по значениям как асимметрии, так и

масс рождающихся нейтронных звезд, получим набор скоростей пульсаров, близкий к наблюдаемому.

По-видимому, первым привлек к объяснению обсуждаемого эффекта оба фактора, как сильное магнитное поле, так и нейтринное излучение, советский астрофизик Н.Н. Чугай в статье 1984 года. Он связал происхождение асимметрии вылета нейтрино с эффектом несохранения четности в слабых взаимодействиях, предположив дополнительно, что у нейтрино имеется большой магнитный момент (тогда нейтрино должно иметь и массу). В настоящее время имеются довольно мягкие экспериментальные ограничения на магнитные моменты нейтрино, однако достаточных теоретических оснований для больших значений магнитных моментов пока нет.

Не будет преувеличением сказать, что проблема больших собственных скоростей пульсаров является в последнее время одной из самых обсуждаемых среди специалистов по физике частиц и астрофизике. В центре дискуссий находится оригинальная модель, предложенная в статье А. Кусенко и Дж. Сегре (G. Segre) 1996 года. Она основывается на давно обсуждаемом (и как будто бы недавно обнаруженном экспериментально) очень интересном эффекте нейтринных осцилляций, то есть переходов нейтрино одного типа в другой. Для возможности осцилляций необходимо наличие массы у нейтрино, а также эффекта смешивания в его взаимодействиях. Влияние магнитного поля на процесс осцилляций приводит к асимметрии вылета нейтрино независимо от эффекта несохранения четности. К сожалению, более детальное обсуждение этой модели увело бы нас далеко за рамки выбранной темы. Отметим только, что дискуссия продолжается и у оппонентов модели Кусенко—Сегре имеются против нее серьезные возражения.

В статье Н.В. Михеева и автора 1997 года рассматривается еще одна возможность получения новорожденным пульсаром начального толчка. В ее основе лежит процесс тормозного рождения электрон-позитронных пар при движении нейтрино

$$\nu \longrightarrow \nu + e^- + e^+,$$

который запрещен в вакууме законами сохранения энергии и импульса, но становится возможным в сильном магнитном поле. Этот процесс является родственным хорошо изученному как теоретически, так и экспериментально рассеянию нейтрино на электро-не

$$\nu + e^- \longrightarrow \nu + e^-.$$

Для реализации процесса с рождением пары не требуется ни массы, ни магнитного момента, ни смешивания нейтрино. Единственной экзотикой является сильное магнитное поле в окрестности центральной части взрывающейся сверхновой, откуда исходит нейт-

ринный поток. Нарушение зеркальной симметрии во взаимодействии нейтрино с электронами приводит под влиянием магнитного поля к асимметрии вылета нейтрино. Однако следует признать, что для получения наблюдаемых величин скоростей пульсаров за счет данного механизма требуются значения магнитного поля и/или средних энергий нейтрино несколько выше тех значений, что считаются общепринятыми. Тем не менее не исключена возможность, что в природе все же реализуется нейтринный реактивный двигатель нейтронной звезды как крупномасштабная демонстрация несохранения четности в слабых взаимодействиях элементарных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ценность фундаментальной науки заключается, в частности, в том, что исследования в какой-то одной области нередко приводят к резкому прогрессу в совершенно других областях знаний или практических приложений. Мы рассмотрели один из ярких примеров взаимодействия двух на первый взгляд далеких друг от друга областей науки, одна из которых — физика элементарных частиц, изучающая процессы в микромире, другая — астрофизика, объектами которой являются представители мегамира — звезды. И хотя проблема больших собственных скоростей пульсаров, возможно, еще далека от решения, даже подходы к ней оставляют впечатление глубокой гармонической взаимосвязи явлений окружающего мира.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Гнедин Ю.Н. Небо в рентгеновских и гамма-лучах // Сороковский Образовательный Журнал. 1997. № 5. С. 74–79.
2. Липунов В.М. “Военная тайна” астрофизики // Там же. 1998. № 5. С. 83–89.
3. Кочаров Г.Е. Термоядерный котел в недрах Солнца и проблема солнечных нейтрино // Там же. 1996. № 10. С. 99–105.
4. Боровой А.А. Как регистрируют частицы: (По следам нейтрино). М.: Наука, 1981. 176 с. (Б-чка “Квант”; Вып. 15).
5. Окунь Л.Б. $\alpha\beta\gamma\dots Z$: (Элементарное введение в физику элементарных частиц). М.: Наука, 1985. 112 с. (Б-чка “Квант”; Вып. 45).

Рецензент статьи А.М. Черепашук

* * *

Александр Васильевич Кузнецов, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова. Область научных интересов — слабые и гипотетические взаимодействия элементарных частиц, нейтринная физика и астрофизика. Автор и соавтор 40 научных публикаций.