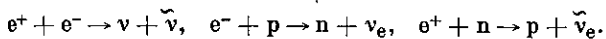


ним уменьшению потока борных Н. В случае Б наиб. естеств. возможность представляются нейтринные осцилляции, существование к-рых предсказывается теорией Н. с конечной массой покоя. Из-за сохранения лептонного числа в ядерных реакциях Солнце генерирует электронные Н., ν_e , к-рые являются смесью состояний с двумя разл. массами. При одинаковой энергии скорости распространения этих состояний различны, благодаря чему на нек-ром расстоянии от Солнца состав их смеси изменяется, а это означает появление примеси состояния другого Н. (напр., мюонного), к-рое не может вызвать превращения $^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar}$ в детекторе Дейвиса. Осцилляции солнечных Н. могут быть наблюдаемы, если разность квадратов масс двух нейтринных состояний $m_1^2 - m_2^2 \sim 10^{-10}$ эВ². Осцилляции Н. могут быть вызваны также их взаимодействиями с веществом. В этом случае дефицит борных Н. можно объяснить т. н. резонансным усилением перехода электронных Н. в Н. др. типа в узком слое солнечного вещества с определенной плотностью.

Др. возможностью объяснения опыта Дейвиса является изменение спираальности Н. вследствие взаимодействия его магн. момента с магн. полем.

Нейтрино от коллапсирующих звёзд. Если масса звёздного ядра превышает $1,2-1,4 M_\odot$, то оно может превратиться в нейтронную звезду или чёрную дыру. На конечной стадии эволюции таких звёздных ядер их плотность возрастает до $10^{10} - 10^{15}$ г/см³, а темп-ра — до $10^{10} - 10^{12}$ К. Осн. механизм потери энергии в этих условиях становится испускание Н., образующихся в реакциях



В качестве характерного примера приведём результаты расчёта потока Н., возникающего при коллапсе железокислородного ядра звезды с массой $2 M_\odot$. Суммарная энергия, уносимая Н., равна $5 \cdot 10^{53}$ эрг, т. е. ок. 15% всей массы звезды, выраженной в энергетич. единицах. Ср. энергия отд. Н. составляет $10-12$ МэВ, а энергетич. спектр близок к тепловому с более крутым падением при высоких энергиях. Длительность нейтринного излучения $10-20$ с. В испускаемом нейтринном потоке присутствуют в равных концентрациях все типы Н. и антинейтрино. Это объясняется тем, что звёздное ядро вплоть до очень больших расстояний от центра непрозрачно для Н. из-за процессов упругого рассеяния на электронах и ядрах. В результате все типы Н. оказываются в тепловом равновесии с веществом вплоть до нек-рой поверхности (нейтриносфера), с к-рой испускание нейтрино происходит прикл. как с чернотельной поверхности. Если в нашей Галактике произойдёт коллапс звезды, её нейтринное излучение может быть зарегистрировано уже существующими телескопами.

При вспышке сверхновой SN 1987A сообщалось о регистрации Н. подземными детекторами КАМИОКАНДЕ (Япония), ИМБ (США), Баксанским (СССР), а также о редком событии (5 импульсов в течение 7 с) в детекторе ИСД (СССР — Италия). Несмотря на нек-рые неясности, эти события интерпретируют как регистрацию Н. от коллапса, предшествующего взрыву сверхновой. Данные детектора КАМИОКАНДЕ с наиб. числом зарегистриров. Н. (11 за 13 с) удовлетворительно согласуются с имеющимися расчётами коллапса. Наблюдения сверхновой SN 1987A позволили получить более сильные (чем прежде) ограничения на свойства Н., в т. ч. на массу, магн. момент и сечение $\nu\nu$ -рассеяния.

Космические нейтрино высоких энергий

Методы детектирования (регистрации) космич. Н. относятся к нейтринной астрономии. Задачи нейтринной астрономии высоких энергий сводятся исключительно к поиску точечных космич. источников Н.; только при сверхвысоких энергиях ($\mathcal{E} \gtrsim 10^8$ ТэВ) ставится задача измерения диффузного потока Н.

Нейтринное излучение высокой энергии (30—1000 ТэВ) генерируется в космич. объектах в результате столкновений ускоренных частиц (космич. лучи) с атомными ядрами (pp-нейтрино) или с низкоэнергетич. фотонами ($\nu\gamma$ -нейтрино) в цепочке распадов заряж. пионов. При степенном спектре ускоренных протонов число Н., генерируемых в pp-взаимодействии, возрастает с уменьшением энергии, однако осн. вклад в сигнал от источника при детектировании дают Н. с энергией выше 30 ТэВ. Т. о., pp-нейтрино с энергией 30—1000 ТэВ определяют диапазон нейтринной астрономии высоких энергий.

В отличие от pp-нейтрино, рождение $\nu\gamma$ -нейтрино происходит пороговым образом: в «фотонном газе» со ср. энергией фотонов ϵ большая часть Н. рождается с энергией, превышающей $\mathcal{E}_0 \approx 4 \cdot 10^{-2} m_\pi \cdot c^2 m_p c^2 / \epsilon \approx 6 \cdot 10^6 / \epsilon$ ТэВ, где m_π и m_p — массы пиона и протона, а ϵ выражено в эВ. Почти для всех известных источников толща окружающего газа невелика (меньше 1 г/см²), в то время как «фотонный газ» для ряда источников (напр., ядер активных галактик) имеет столь большую плотность, что источник оказывается непрозрачным для протонов высокой энергии. Это приводит к высокой эффективности генерации $\nu\gamma$ -нейтрино. Для многих источников генерация $\nu\gamma$ -нейтрино имеет пороговую энергию $\approx 5 \cdot 10^6$ ТэВ. Регистрация Н. с $\mathcal{E}_0 \gtrsim 5 \cdot 10^6$ ТэВ относится к нейтринной астрономии сверхвысоких энергий. Потеря в интенсивности потока Н. сверхвысоких энергий вследствие падающего спектра протонов компенсируется повышенной эффективностью генерации $\nu\gamma$ -нейтрино благодаря значит. возрастанию сечения взаимодействия Н. в детекторе (вследствие резонансного характера реакции $\bar{\nu}_e + e \rightarrow W^- \rightarrow$ адроны, имеющей максимум в сечении при энергии $\approx 6,4 \cdot 10^6$ ТэВ) и возможностью использования больших объёмов воды при детектировании Н. акустич. методом.

Нейтринная астрономия высоких и сверхвысоких энергий имеет ряд уникальных возможностей по сравнению с гамма-астрономией; в частности, она позволяет исследовать плотные объекты и отдалённые космологич. эпохи, недоступные средствам гамма-астрономии. Нейтринная астрономия высоких энергий может использовать лишь оптич. методы регистрации, при к-рых макс. объём детектора ограничен, по-видимому, величиной 10^6 м³. С детекторами такого объёма возможна регистрация галактич. источников и лишь единичных событий от внегалактич. источников. К наиб. интересным галактич. источникам Н. относятся двойные звёздные системы, молодые (до 1 года) оболочки сверхновых и «скрытые источники» — пульсары или чёрные дыры, окружённые большой толщей вещества.

Одним из галактических источников, от к-рых ожидается регистрируемый поток Н. высоких энергий, является тесная двойная система Лебедь X-3 (см. *Гамма-астрономия*). От этого источника зарегистрировано перемешанное гамма-излучение высокой ($\sim 10^8$ ТэВ) и сверхвысокой ($\sim 10^4 - 10^7$ ТэВ) энергии, с периодом 4,8 ч. Предполагается, что гамма-излучение генерируется в результате взаимодействия ускоренных протонов с макс. энергиями до $10^8 - 10^9$ ТэВ с атомными ядрами газа, окружающего массивную звезду двойной системы. Этот процесс сопровождается генерацией Н. высоких энергий. Мид. нейтринный поток, совместимый в рамках описываемой модели с наблюдаемым потоком гамма-излучения, должен быть зарегистрирован проектируемыми установками «Байкал» (СССР) и ДЮМАНД (США).

Др. типом «перспективных» нейтринных источников являются молодые оболочки сверхновых. В результате взрыва сверхновой происходит сброс оболочки звезды и в ряде случаев образование пульсара в центре. Молодые плотные оболочки сверхновых могут содержать частицы высоких энергий, ускоренные в разл. процессах (в частности, в магнитосфере пульсара). В оболочке с массой $M \sim 1 M_\odot$ и скоростью расширения $\sim 10^9$ см/с ускоренные протоны в течение ~ 5 мес