

волнами. Наличие этих волн увеличивает скорость пересоединения. Н. т. с. подвержен действию тирингнеустойчивости. Изучение Н. т. с. важно, в частности, для объяснения солнечных вспышек и магнитосферных суббурь.

Лит.: Прист Э. Р., Солнечная магнитогидродинамика, пер. с англ., М., 1985; Основы физики плазмы, под ред. А. А. Галева, Р. Судана, т. 1—2, М., 1983—84.

## НЕЙТРИННАЯ АСТРОФИЗИКА

### Содержание:

Введение . . . . .	256
Космологические нейтрино . . . . .	256
Звёздные нейтрино . . . . .	256
Космические нейтрино высоких энергий . . . . .	257

### Введение

Н. а. изучает физ. процессы в космич. объектах, происходящие с участием нейтрино (Н.). Проблемы регистрации космич. Н. относятся к нейтринной астрономии.

Н. во Вселенной подразделяют по их источникам генерации и энергетич. диапазону на космологические (реликтовые), звёздные и космич. Н. высоких энергий.

На ранних стадиях горячей Вселенной, в течение прибл. 1 с после начала расширения, Н. находились в тепловом равновесии с веществом. От этой эпохи нам остался сильно остывший с тех пор газ космологич. Н. Его темп-ра в настоящее время равна 1,9 К, а ср. энергия  $5 \cdot 10^{-4}$  эВ.

В обычных звёздах, типа Солнца, Н. рождаются в ядерных реакциях, обеспечивающих наблюдаемую светимость. При звёздных коллапсах темп-ра в центре звёзд повышается настолько, что в тепловом равновесии оказываются позитроны, мюоны и пионы, к-рые образуют Н. в реакциях  $e^+ + e^- \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ ,  $\mu \rightarrow e + \nu + \bar{\nu}$ ,  $\pi \rightarrow \mu + \nu$  и т. д. Энергии этих звёздных Н. находятся в осн. в диапазоне от долей до неск. десятков МэВ.

Н. рождаются также космич. лучами. Ускоренные до высоких энергий протоны или др. атомные ядра, сталкиваясь с ядрами атомов газа или с низкоэнергетич. фотонами, производят  $\pi$ - и К-мезоны, в результате распада к-рых возникают космич. Н. высоких энергий. Их энергетич. диапазон, доступный регистрации, — от неск. десятков ГэВ до, возможно,  $10^{15}$ — $10^{16}$  эВ.

### Космологические нейтрино

Через время  $\sim 1$  с после начала расширения Вселенной её темп-ра упала до  $10^{10}$  К. Концентрация частиц в космич. плазме уменьшилась, свободный пробег Н. увеличился настолько, что они вышли из теплового равновесия с плазмой. Горячий нейтринный газ, содержащий все три типа Н. (и антинейтрино), «оторвался» от вещества и, расширяясь вместе со Вселенной, стал остывать как независимый, не взаимодействующий с веществом, компонент. Из связи с измеренной темп-рой фотонного газа (2,7 К) следует, что темп-ра нейтринного газа в настоящее время составляет 1,9 К (см. *Горячей Вселенной теория*). Это означает, что в ср. в  $1 \text{ см}^3$  космич. пространства содержится  $\approx 330$  Н. всех типов (включая антинейтрино) со ср. энергией каждой частицы  $\approx 5 \cdot 10^{-4}$  эВ. Пока нет практически осуществимого метода регистрации этих реликтовых Н. Тем не менее несомненное существование газа реликтовых Н. (косвенно оно подтверждается измерениями реликтовых фотонов аналогичного происхождения) позволяет получить ряд выводов об их роли в эволюции Вселенной.

Число типов Н. (электронные, мюонные, тау и, возможно, др.) влияет на синтез лёгких элементов (дейтерий, гелий, литий) в горячей Вселенной, поскольку от числа типов Н. зависит скорость расширения Вселенной на стадии нуклеосинтеза. Сопоставление указанных выше процессов с наблюдениями позволяет получить ограничения на свойства Н. Из наблюдаемого обилия космич. дейтерия следует, что число воз-

можных типов Н. не может превышать 4. При известной концентрации  $n$ , реликтовых Н. их масса должна быть такова, чтобы плотность нейтринного газа  $m_n$ , не приводила к возрасту Вселенной, меньшему, чем возраст наблюдаемых объектов, напр. Солнца или Галактики. Это даёт ограничение сверху на сумму масс всех типов Н.:  $\sum_i m_{\nu_i} < 40 \text{ эВ}$ .

### Звёздные нейтрино

**Солнечные нейтрино.** Наблюдаемая светимость Солнца обеспечивается ядерной энергией, выделяющейся в *водородном цикле*. В реакциях  $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$ ,  ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$  и  ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$  этого цикла испускаются Н., называемые соответственно рр-нейтрино, бериллиевыми Н. и борными Н. Помимо них имеются ещё т. н. ре-нейтрино, образующиеся при слиянии двух протонов и электрона:  $p + e + p \rightarrow {}^2\text{D} + \nu_e$ . Если Солнце — стационарный источник, то предсказываемое полное число Н., испускаемое в 1 с, не зависит от модели Солнца. Действительно, при превращении четырёх протонов в ядро гелия (в этом и состоит водородный цикл)  $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu_e$  освобождается  $Q = 26,7$  МэВ ядерной энергии, к-рая в конце концов высвечивается как тепловая энергия с поверхности Солнца. Т. о., высвечивание порции энергии  $Q$  сопровождается испусканием двух Н. Кол-во Н. ( $N_\nu$ ), излучаемых в 1 с, полностью определяется светимостью Солнца  $L_\odot = 3,8 \times 10^{33}$  эрг/с:

$$N_\nu = 2L_\odot/Q = 1,8 \cdot 10^{38} \text{ нейтрино/с.}$$

Однако энергетич. спектр излучаемых Н., и особенно высокоэнергетич. часть спектра, самым существенным образом зависит от таких деталей солнечных моделей, как темп-ра в центре Солнца и концентрация гелия, т. к. от этих параметров зависит конкуренция между разл. ответвлениями реакций водородного цикла. Энергии рр-нейтрино, борных Н. и ре-нейтрино сильно отличаются друг от друга. Макс. энергия рр-нейтрино равна 0,420 МэВ, ре-нейтрино и бериллиевые Н. имеют точно фиксированные энергии 1,44 мэВ и 0,861 МэВ соответственно. Наиб. энергии имеют борные Н.: их спектр простирается от нулевых энергий до 14,06 МэВ. Вычисления нейтринного потока для стандартной модели Солнца, выполненные Дж. Бакаллоом (J. Bahcall, США), дают величину  $7,9 \pm 2,6$  SNU (SNU — Солнечная нейтринная единица, соответствует  $10^{-36}$  захватов Н. в секунду на атом Cl), в то время как измеренный на установке Р. Дейвиса (R. Davis, США) ср. поток Н. (1970—1988) с энергией выше 0,814 МэВ составляет  $2,3 \pm 0,25$  SNU. Расхождение предсказываемого и измеренного значений может объясняться двумя общими причинами: А) более сложными физ. процессами в Солнце, не отражёнными в принятых моделях Солнца; эти процессы могут уменьшать поток Н. в измеряемой в опыте Дейвиса высокоэнергетич. части спектра (экстремальная возможность, при к-рой происходит уменьшение полного потока Н., — это наличие другого источника энергии в Солнце, напр. маленькой чёрной дыры или тяжёлых реликтовых частиц, при аннигиляции к-рых выделяется необходимая энергия); Б) свойствами Н. [напр., осцилляциями Н. (представление о них впервые введено Б. М. Понтекорво в 1957), распадом Н. на пути от Солнца до Земли, аномальным взаимодействием Н., приводящим к переворачиванию спина относительно импульса, и др.]. Наиб. правдоподобная модификация стандартной модели Солнца может быть обусловлена наличием тяжёлых слабо взаимодействующих реликтовых частиц (космионов, или вимпов) в солнечном ядре, к-рые обеспечивают его дополни-т. охлаждение. Другие возможности связаны с солнечными колебаниями и (или) периодич. перемешиванием вещества в центральных областях Солнца. Эти явления приводят к периодич. уменьшению темп-ры в центре Солнца и связанному с