

теряют энергию гл. обр. на образование пионов в ядерных столкновениях, и, следовательно, в течение этого времени оболочка является активным нейтринным излучателем. При мощности генерации космич. лучей в оболочке  $\sim 10^{43}$  эрг/с она за 5 мес излучает  $2 \cdot 10^{48}$  мюонных Н. с энергией выше 100 ГэВ.

В качестве примера «скрытого источника», к-рый должен проявляться в основном в нейтринном излучении, рассматривается модель массивной звезды-сверхгиганта с массой  $10 M_{\odot}$  и радиусом  $7 \cdot 10^{13}$  см. В центр. области звезды находится двойная система — пульсар и ядро массивной звезды, похожее на белый карлик. Если светимость пульсара составляет  $3 \cdot 10^{38}$  эрг/с, то давление излучения создаёт вокруг пульсара разреженную полость, где могут ускоряться протоны. Проникая в оболочку, они рождают там в цепочке распада пионов фотоны, электроны и Н., из к-рых только последние могут пройти сквозь толстый слой вещества ( $\sim 10^6$  г/см<sup>2</sup>) наружу. Наблюдаемый во всех диапазонах эл.-магн. излучения, включая рентг. и гамма-диапазоны, источник будет выглядеть как обычная звезда-сверхгигант со светимостью  $\sim 10^{38}$  эрг/с и темп-рой 2500 К, и лишь регистрация Н. высоких энергий может раскрыть его подлинную природу.

Из внегалактич. источников Н. следует отметить активные ядра галактик и молодые галактики в фазе их повышенной светимости (яркая фаза). В последнем случае источником Н. становится всё металактич. пространство, заполненное реликтовыми фотонами. Протоны, сталкиваясь с ними, рождают заряж. пионы, при распаде к-рых образуются Н. Большие потоки Н. возникают в том случае, если яркая фаза имела место при больших красных смещениях  $z > 10-20$ . Энергия реликтовых фотонов в эту эпоху была в  $(1+z)$  раз больше, чем теперь, благодаря чему в образовании пионов (и следовательно Н.) принимали участие протоны меньших, чем теперь, энергий. Спектр Н. несёт информацию о красном смещении эпохи яркой фазы: он имеет максимум при энергии, определяемой только величиной  $z$ :  $\mathcal{E}_{\text{макс}} = 6 \cdot 10^6 [20/(1+z)]^2$  ГэВ. Большие потоки Н. могли возникать и на догалактич. стадиях.

Лит.: Герштейн С. С., Зельдович Я. В., Масса покоя мюонного нейтрино и космология, «Письма в ЖЭТФ», 1966, т. 4, с. 174; Зельдович Я. В., Новиков И. Д., Релятивистская астрофизика, М., 1967; Березинский В. С., Зацепин Г. Т., Возможности экспериментов с космическими нейтрино очень высоких энергий: проект ДЮМАНД, «УФН», 1977, т. 122, с. 3; Новиков И. Д., Эволюция Вселенной, 3 изд., М., 1990; Астрофизика космических лучей, М., 1984; Имшенник В. С., Наёжжигин Д. К., Сверхновая 1987А в Большом Магеллановом облаке: наблюдения и теория, «УФН», 1988, т. 156, с. 561.  
В. С. Березинский.

НЕЙТРИНО

Содержание:

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| Введение              | 258 |
| История открытия Н.   | 258 |
| Основные свойства Н.  | 259 |
| Взаимодействия Н.     | 262 |
| Смешивание и массы Н. | 265 |

Введение

Н. (символ  $\nu$ ) — лёгкая (возможно, безмассовая) электрически нейтральная не обладающая цветом частица со спином  $1/2$ . Н. участвует в слабом и гравитац. взаимодействиях, принадлежит к классу лептонов, а по статистич. свойствам является фермионом. Наблюдались Н. трёх типов: электронные ( $\nu_e$ ), мюонные ( $\nu_{\mu}$ ) и  $\tau$ -нейтрино ( $\nu_{\tau}$ ) в соответствии с наличием трёх типов заряж. лептонов. Н. каждого типа имеют античастицу — антинейтрино ( $\bar{\nu}$ ). Нестабильность Н. пока не обнаружена. Отличит. свойствами Н. являются исключительно большая проникающая способность при низких энергиях и быстрый рост сечений взаимодействий с увеличением энергии.

Н. — столь же часто встречающиеся объекты, как и фотоны. Они испускаются при превращениях атомных ядер и в распадах частиц ( $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $K$  и т. д.); процессы,

приводящие к образованию Н., происходят в недрах Земли, её атмосфере, внутри Солнца и др. звёзд; при этом Н. (за редким исключением) беспрепятственно выходят из источников своего возникновения. Предсказывается генерация мощных нейтринных вспышек при гравитационных коллапсах звёздных ядер. Согласно модели горячей Вселенной, космич. пространство заполнено реликтовыми Н. с энергией  $\sim 10^{-4}$  эВ и плотностью  $300$   $\nu$ /см<sup>3</sup>. Потоки высокоэнергичных Н., вплоть до  $\mathcal{E}_{\nu} \sim 10^{21}$  эВ, генерируются во взаимодействиях космических лучей с межзвёздной средой. В лаб. условиях пучки Н. создаются с помощью радиоактивных источников, ядерных реакторов, на ускорителях протонов высокой энергии ( $\gg 1$  ГэВ) и мезонных фабриках.

С уникальной проникающей способностью Н. связано развитие таких направлений, как нейтринная астрофизика и нейтринная геофизика. При увеличении плотности вещества и пространств. масштабов явлений роль Н. возрастает. Наблюдаемые потоки Н. несут информацию о процессах, происходящих в центре Солнца и межзвёздном пространстве, о ранней Вселенной и конечных стадиях эволюции звёзд (см. Нейтринная астрофизика). Предполагается использовать пучки Н. для исследования строения Земли, поиска полезных ископаемых и т. д.

Изучение таких процессов с участием Н., как  $\beta$ -,  $\mu$ -,  $W$ -распады,  $\nu$ -рассеяние на нуклонах и электронах, сыграло решающую роль в построении и проверке теории электрослабого взаимодействия. Н. из трудноуловимого объекта превратилось в инструмент исследования структуры др. частиц.

История открытия Н.

Гипотеза Паули. Теория Ферми. Представление о Н. было введено в 1930 В. Паули (W. Pauli) с целью разрешить парадоксы  $\beta$ -распада [1]. Первый из них касался «несохранения энергии». При переходе между двумя стационарными состояниями ядер вылетали электроны с произвольными энергиями вплоть до нек-рой граничной; их спектр, впервые измеренный в 1914 Дж. Чедвиком (J. Chadwick) в распаде  $^{210}\text{Bi}(\text{RaE}) \rightarrow ^{210}\text{Po} + e^-$ , оказался непрерывным. Ни потеря энергии при вылете электронов из атомов, ни эл.-магн. излучения, сопутствующего электронам, не было обнаружено [калориметрич. эксперимент Ч. Эллиса (Ch. Ellis) и У. А. Вустера (W. A. Wooster)]. Второй парадокс состоял в нарушении Паули теоремы о связи спина со статистикой: у начального и конечного ядер в  $\beta$ -распаде статистика одинакова (т. к. одинаковые ат. номера  $A$ ), и, следовательно, электрон должен был подчиняться Бозе — Эйнштейна статистике. В действительности же он подчиняется Ферми — Дирака статистике, т. к. его спин равен  $1/2$ .

В письме участникам семинара в Тюбингене (Германия) Паули высказал гипотезу о существовании новой электрически нейтральной сильно проникающей частицы («нейтрона») со спином  $1/2$ . В  $\beta$ -распаде с каждым электроном испускается такой «нейтрон», причём сумма энергий электрона и «нейтрона» постоянна. Т. о. оба парадокса были разрешены. Оставался вопрос: как удерживается Н. в ядре? Его решение было связано с открытием в 1932 «настоящего» нейтрона и построением в 1934 Э. Ферми (E. Fermi) теории  $\beta$ -распада [при этом Ферми предложил называть частицу Паули уменьшительно от «нейтрон» — «нейтрино» (итал.)]. Подобно тому, как возбуждённый атом испускает фотон, в  $\beta$ -распаде один из нейтронов ядра испускает пару — электрон и Н. (точнее, антинейтрино), и превращается в протон:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1)$$

(для  $\beta^+$ -распада соответственно:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ). В исходном ядре Н. нет. Согласно теории Фер-