

зики. Экстремальные физ. условия в Н. а. делают их уникальными естеств. лабораториями, представляющими обширный материал для исследования физики ядерных взаимодействий, элементарных частиц и теории гравитации.

Лит.: Гинзбург В. Л., О физике и астрофизике, 3 изд., М., 1980; Зельдович Я. Б., Новиков И. Д., Теория тяготения и эволюции звезд, М., 1971; Шакура Н. И., Нейтронные звезды и «черные дыры» в двойных звездных системах, М., 1976; Смит Ф. Г., Пульсары, пер. с англ., М., 1979; Манчестер Р., Тейлор Дж., Пульсары, пер. с англ., М., 1980; Шапиро С., Тьюколски С., Черные дыры, белые карлики и нейтронные звезды, пер. с англ., ч. 1—2, М., 1985. Д. К. Набёжис.

**НЕЙТРОННЫЕ ИСТОЧНИКИ** — устройства для получения нейтронных пучков. Действие всех типов источников основано на использовании ядерных реакций, сопровождающихся вылетом нейтронов. Н. и. характеризуются интенсивностью (число нейтронов в 1 с), энергетических и угловых распределениями, степенью поляризации нейтронов (см. *Поляризованные нейтроны*) и режимом испускаемых (непрерывным или импульсным).

Простейшие Н. и. (радиоизотопные) содержат либо спонтанно делящиеся ядра (напр.,  $^{252}\text{Cf}$ ), либо однородную смесь порошков Ве и  $\alpha$ -активного нуклида ( $^{230}\text{Po}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ), излучающую нейтроны в результате реакции  $^9\text{Be} + ^4\text{He} = ^{12}\text{C} + \text{n}$ . Макс. мощность таких Н. и. ( $\sim 10^8$  нейтрон/с) ограничена допустимой активностью радиоакт. препаратов. Достоинства радиоизотопных Н. и. — малые габариты, портативность и стабильность (хотя мощность источника плавно падает в соответствии с периодом полураспада радиоакт. нуклида). Их недостатки, кроме низкой мощности, — широкий энергетич. спектр нейтронов (0,1 — 12 МэВ) и высокий уровень сопровождающего  $\gamma$ -излучения.

Более мощные Н. и., испускающие  $10^7 - 10^{13} \text{ с}^{-1}$ , — небольшие эл.-статич. ускорители, в к-рых ядра дейтерия  $^2\text{H}$ , ускоренные до энергии  $\sim 200$  кэВ, бомбардируют мишень, содержащую тритий  $^3\text{H}$ . В результате реакции  $^2\text{H} + ^3\text{H} = ^4\text{He} + \text{n}$  образуются практически моноэнергетич. нейтроны с энергией  $\sim 14$  МэВ. Такие Н. и. используются для нейтронного *активационного анализа*, нейтронного каротажа, *нейтронно-графии*.

Еще более мощными Н. и. являются исследовательские *ядерные реакторы*, испускающие  $5 \cdot 10^{16} \text{ с}^{-1}$  на каждый МВт мощности реактора. Реактор как Н. и. обычно характеризуется не полным кол-вом испускаемых нейтронов, а макс. плотностью  $N$  их потока (яркость) внутри активной зоны или замедлителя реактора. В исследовательских реакторах  $N$  достигает  $10^{15} \text{ с}^{-1} \text{ с} \cdot 1 \text{ см}^2$ . Хотя в реакции *деления ядер* ср. энергия образующихся нейтронов  $\sim 2$  МэВ, в результате замедления нейтронов в конструкц. элементах и замедлителе спектр нейтронов обычно сильно обогащен тепловыми нейтронами (максимум в области 0,06 эВ). Ещё большая яркость  $\sim 10^{17} \text{ с}^{-1} \text{ с} \cdot 1 \text{ см}^2$  (в импульсе длительностью 100 мкс) достигается в *импульсных реакторах*.

Высокая плотность потока нейтронов получается также при использовании мощных электронных или протонных ускорителей (см. *Нейтронный генератор*).

В. И. Луциков.

**НЕЙТРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР** — установка для получения нейтронных пучков высокой интенсивности, состоящая из *сильноточного ускорителя* заряд. частиц (протонов, дейтронов, электронов) и мишени — конвертора. Интенсивные импульсные потоки нейтронов получают с помощью протонных ускорителей — т. н. *мезонных фабрик*, в к-рых нейтроны непосредственно выбиваются протонами из ядер. При энергии протонов 1 ГэВ каждый протон выбивает из урановой мишени до 30—50 нейтронов. Напр., Лос-Аламосская мезонная фабрика (США) с накопит. кольцом генери-

рует пучки нейтронов (при длительности импульса 250 нс и частоте повторения 12 Гц) интенсивностью ок.  $10^{16} \text{ с}^{-1}$ .

Генерирование мощных нейтронных потоков предусматривается также в нек-рых проектах коасных (адронных) фабрик. Так, в адронной фабрике в Японии планируется, в частности, получение потока нейтронов в надтепловой и холодной областях спектра (на единичный интервал энергии) в ср. более  $10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1} \text{ эВ}^{-1}$ , а в ультрахолодной области более  $10^5 \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

В электронных ускорителях нейтроны получаются в результате фотонейтронной реакции ( $\gamma, \text{n}$ ) от тормозного излучения электронов, падающих на вольфрамовую или урановую мишень. При энергии электронов 30 МэВ генерируется 1 нейтрон на 100 электронов. Наиб. крупным электронным ускорителем, используемым для получения интенсивных импульсных потоков нейтронов (до  $3 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ ), является линейный ускоритель «ORNL» (Ок-Ридж, США) с энергией электронов 140 МэВ, импульсным током до 20 А, длительностью импульса 7—20 нс, частотой повторения  $10^3$  Гц.

Перспективы Н. г. на основе мощных *линейных ускорителей* протонов и дейтронов на энергии 1—1,6 ГэВ с током 0,1 — 1 А. В мишенях таких Н. г. реализуются ядерные реакции расщепления дейтрона на протон и нейтрон, к-рые дают высокий выход нейтронов и возможность управления их потоками. Напр., при токах протонов  $\sim 100$  мА энергии 1 ГэВ на мишенях из Pb, Bi, U генерируются потоки нейтронов до  $10^{19} \text{ с}^{-1}$ . Н. г. типа предполагается использовать для исследования радиационной стойкости материалов, исследований в области ядерной физики и химии. Обсуждаются возможности их применения с мишенями из делящихся материалов для получения ядерного горючего ( $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{233}\text{U}$ ) в пром. масштабах. Мощные Н. г. предполагается также использовать для перевода долгоживущих радионуклидов, содержащихся в «отходах» ядерных реакторов, в короткоживущие (т р а н с м у т а ц и я), для «наработки» трития (через мишень, содержащую отходы, прокачивают жидкий Li), а также для получения трансураниевых элементов (напр.,  $^{252}\text{Cf}$ ).

Лит.: Технологические аспекты ядерных энергетических систем с воспроизводством топлива, под ред. Г. Бауэра, А. Макдональда, пер. с англ., М., 1988.

Б. П. Мулин.

**НЕЙТРОНОВОД** — канал, по к-рому распространяется направленный поток нейтронов. В простейшем случае Н. служит прямая вакуумированная труба, окружённая защитой для поглощения нейтронов, выходящих через боковые стенки Н. Надтепловые нейтроны (с энергией  $\epsilon > 0,1$  эВ) практически не взаимодействуют с внеш. полями (магн., гравитационным) и поэтому распространяются по Н. прямолинейно по законам геом. оптики. Для формирования пучков внутри Н. устанавливаются коллиматоры из материалов, поглощающих нейтроны. Плотность потока нейтронов в таких Н. уменьшается как  $1/r^2$ , где  $r$  — расстояние от центра источника нейтронов. Обычно применяются Н. длиной 10—1000 м, диам. 5—50 см с входными и выходными окнами из Al, толщиной 1—2 мм, откаченные до давления 1—2 Па. Н. используются для вывода сформиров. пучков нейтронов из источника (реактор, ускоритель), а также в сочетании с импульсными нейтронными источниками в *нейтронной спектроскопии* по времени пролёта.

Для нейтронов с энергией  $\epsilon < 0,1$  эВ используются зеркальные Н., основанные на полном отражении нейтронов от стенок Н. Упругое когерентное рассеяние нейтронов на атомных ядрах в стенках Н. эквивалентно действию на нейтроны небольшого отталкивающего потенциала  $U \lesssim 2-3 \cdot 10^{-7}$  эВ (для Ni, Be, графита). Поэтому нейтроны с энергией  $\epsilon_0$ , падающие на гладкие (зеркальные) стенки Н. под углами  $\alpha < (U/\epsilon_0)^{1/2}$ ,