

приводит к тому, что в отличие от заряж. частиц нейтроны любых энергий обладают большой проникающей способностью. Внутри вещества нейтроны в основном взаимодействуют с атомными ядрами, а при больших энергиях — с отд. нуклонами, входящими в состав ядер, и практически «не замечают» электронов атомных оболочек. Характер и интенсивность нейтронно-ядерных взаимодействий существенно зависят от энергии нейтронов \mathcal{E}_n , а также от взаимной ориентации спинов нейтрона и ядра.

Нейтроны условно разделяют на энергетич. диапазоны (табл.), отличающиеся методами получения и регистрации нейтронов, а также направлениями их использования.

При любых энергиях и на всех ядрах с заметной вероятностью происходит упругое рассеяние нейтронов.

Энергетическая классификация нейтронов

Нейтроны	Энергия, эВ	Скорость, см/с	Ср. длина волны, см	Ср. темп-ра T, К
Быстрые	10^5	10^9	10^{-12}	10^{10}
Медленные промежуточные резонансные	$10^4 - 10^3$ $0,5 - 10^4$	10^8 10^7	$3 \cdot 10^{-11}$ $3 \cdot 10^{-10}$	10^5 10^5
Тепловые	$0,5 - 5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-9}$	300
Холодные	$5 \cdot 10^{-3} - 10^{-7}$	$4 \cdot 10^4$	10^{-7}	10
Ультрахолодные	10^{-7}	$5 \cdot 10^2$	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}

Быстрые нейтроны способны испытывать на ядрах неупругое рассеяние, отдавая часть своей энергии на возбуждение ядра, и вызывать эндотермич. ядерные реакции, напр. $(n, 2n)$, (n, np) , (n, α) . Сечения этих реакций сравнительно плавно зависят от \mathcal{E}_n (выше характерного для них энергетич. порога), и их исследование позволяет изучать механизм распределения энергии возбуждения между составляющими ядро нуклонами (см. *Ядерные реакции*).

Медленные нейтроны в основном упруго рассеиваются на ядрах или вызывают экзотермич. ядерные реакции. К таким реакциям относится захват нейтрона ядром, сопровождающийся вылетом из ядра одного или неск. γ -квантов (*радиационный захват*). Три др. типа ядерных реакций, энергетически выгодных для ряда ядер после захвата медленного нейтрона, — (n, p) , (n, α) и деление ядер. Реакции ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$; ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$; ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ используются в нейтронных детекторах, а также (за исключением первой) для защиты от нейтронного излучения. Последняя реакция применяется для пром. получения ${}^3\text{H}$. Реакция деления вызывается медленными нейтронами только на наиб. тяжёлых ядрах (U, Th и т. д.).

Термин «резонансные нейтроны» обусловлен наличием резонансных максимумов (нейтронных резонансов) в энергетич. зависимости эффективных сечений $\sigma(\mathcal{E}_n)$ взаимодействия нейтронов с веществом. Исследования с резонансными нейтронами дают возможность изучать спектры возбуждений ядер (см. *Нейтронная спектроскопия*). В области энергии промежуточных нейтронов резонансная структура нейтронных сечений сглаживается из-за перекрытия соседних резонансов, количество к-рых быстро увеличивается с ростом энергии возбуждения ядра. При энергии нейтрона меньше первого резонансного уровня сечение всех ядерных реакций обратно пропорционально скорости нейтрона (закон $1/v$).

Энергия тепловых нейтронов сравнима с энергией тепловых колебаний атомов в конденсир. веществе (фононов), а длина волны λ — с межатомными расстояниями. Поэтому при прохождении тепловых нейтронов через вещество они могут существенно изменять свою энергию, приобретая или отдавая её тепловым колебаниям атомов или молекул. По наблюдаемой величине таких изменений может быть измерен фоновый спектр вещества.

При прохождении пучка тепловых нейтронов через монокристаллы отд. атомы кристаллич. решётки могут рассеивать нейтроны когерентно, что приводит к *дифракции нейтронов* — резкому увеличению рассеяния нейтронов с определённой длиной волны на нек-рый угол θ , связанный с межплоскостным расстоянием в решётке кристалла (d) *Брэгга — Вульфа* условием: $\lambda = 2d \sin \theta$. Т. о., с помощью дифракции нейтронов определяются положения атомов в кристаллах.

Наличие у нейтрона магн. дипольного момента вызывает магн. рассеяние нейтрона на атомных электронах, что даёт возможность изучать магн. структуру и динамику магн. материалов (см. *Магнитная нейтронная графия*).

Холодные нейтроны используются для изучения медленных диффузионных движений атомов и молекул в разл. средах, а также для исследования белковых *макромолекул*, полимеров, микродефектов и микронеподороностей в растворах и сплавах (см. *Нейтронная структурная, неупругое рассеяние нейтронов*).

Ультрахолодные нейтроны полностью отражаются от большинства материалов за счёт слабого отталкивающего потенциала, возникающего на границе вакуум — среда. Это отражение может быть описано мнимым показателем преломления для нейтронного излучения $n > 500 \text{ \AA}$. Ультрахолодные нейтроны способны накапливаться и длит. время (сотни с) храниться в замкнутом сосуде в виде своеобразного нейтронного газа (подробнее см. *Ультрахолодные нейтроны*).

Важное место в Н.ф. занимают исследования самого нейтрона как одной из фундам. частиц, в частности выяснение, обладает ли нейтрон помимо магн. дипольного момента др. эл.-магн. характеристиками: электрич. дипольным моментом, электрич. поляризуемостью, а возможно, и очень малым электрич. зарядом (см. *Нейтрон*).

Практически во всех нейтронно-физ. исследованиях используются моноэнергетич. пучки нейтронов со степенью монохроматизации $\sim 10^{-2}$. Интенсивные пучки быстрых нейтронов получают на ускорителях заряж. частиц из реакций (p, n) и (d, pn) . Энергия нейтронов меняется при изменении энергии первичных заряж. частиц, падающих на мишень. Медленные нейтроны могут быть получены за счёт реакции (γ, n) с послед. замедлением нейтронов. Однако в этом случае нейтронные пучки не имеют необходимой монохроматичности (см. *Нейтронные источники*).

Мощными источниками тепловых нейтронов являются спец. исследовательские *ядерные реакторы*, у к-рых внутри замедлителей потоки тепловых нейтронов достигают 10^{16} нейтрон/см²·с. Моноэнергетич. тепловые нейтроны получают с помощью дифракции нейтронов на монокристаллах. Для получения холодных нейтронов используются замедлители, охлаждаемые до темп-ры жидкого азота и даже жидкого водорода (20 К). Ультрахолодные нейтроны выводятся из замедлителей резко изогнутыми вакуумными *нейтронводами*.

Универсальным методом получения монохроматич. нейтронов является т. н. метод времени пролёта, в к-ром энергия нейтрона \mathcal{E}_n определяется по времени t , затрачиваемому нейтроном на пролёт расстояния L :

$$\mathcal{E}_n = (72,3L/t)^2.$$

Для использования этого метода необходимы импульсные источники нейтронов.

Результаты нейтронно-физ. исследований имеют особое практич. значение в связи с проблемами ядерной энергетики, т. к. в процессах цепного деления ядер и термоядерного синтеза нейтроны играют осн. роль (см. *Управляемый термоядерный синтез*).

Лит.: В л а с о в Н. А., Нейтроны, 2 изд., М., 1971; Г у р е в и ч И. И., Т а р а с о в Л. В., Физика нейтронов низких энергий, М., 1965.

В. И. Луцкий.
НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ, см. в ст. *Активационный анализ*.