

Тепловые нейтроны имеют спектр, близкий к максвелловскому. Средняя энергия теплового движения нейтронов $\bar{E}_n = \frac{3}{2} kT$, наиболее вероятная энергия $E_n = kT$, где k — постоянная Больцмана. При комнатной температуре $T \approx 300^\circ \text{K}$ и тепловая энергия нейтрона

$$E_n = kT = \frac{1,38 \cdot 10^{-16} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-12}} \approx 0,025 \text{ эв.}$$

В таблице 3 приведено среднее число столкновений, необходимое для того, чтобы уменьшить энергию нейтрона от 1 Мэв до 0,025 эв в разных средах.

Таблица 3

Изотоп	H ₁ ¹	H ₁ ²	He ₂ ⁴	Ve ₄ ⁹	C ₆ ¹²	O ₈ ¹⁶	U ₉₂ ²³⁸
A	1	2	4	9	12	16	238
Число столкнове- ний	18	25	42	90	114	150	2100
$\sigma_{\text{захв}}$ барн	0,33	$4,6 \cdot 10^{-4}$	0	$9 \cdot 10^{-3}$	$4,510^{-3}$	$2 \cdot 10^{-4}$	

Как видно из таблицы, у водорода велико сечение поглощения тепловых нейтронов и его невыгодно использовать в чистом виде в качестве замедлителя.

Чтобы процесс замедления происходил быстрее, желательно использовать твердый или жидкий замедлитель, так как в нем ядра «упакованы» теснее и чаще происходят столкновения. Теоретически идеальным замедлителем может быть жидкий гелий, он практически не поглощает нейтроны, но он существует лишь при температуре $4,2^\circ \text{K}$, поэтому его трудно использовать.

Из других веществ, приведенных в таблице, часто используют дейтрон, находящийся в тяжелой воде, бериллий и углерод.

§ 36. МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ

Большинство источников дает нейтроны с неодинаковой энергией. Часто их спектр довольно широкий. Однако для многих исследований необходимо иметь большое разрешение по энергиям. Например, при изучении зависимости эффективного сечения какого-либо процесса от энергии нейтронов нужно выделять из непрерывного спектра нейтроны заданной энергии.

Нейтроны можно разделить по энергиям двумя методами.

Метод времени пролета. Идея этого метода состоит в том, чтобы выделить нейтроны с определенными скоростями, используя разницу во времени их пролета от источника до детектора. Для того чтобы нейтроны различных энергий вылетали одновременно, применяются механические прерыватели или импульсные источники нейтронов. С другой стороны, используются детекторы с кратковременной чувствительностью. Моменты открытия детектора отстают от моментов испускания нейтронных импульсов на t сек (рис. 79). Если расстояние от источника до детектора равно L см, то будут регистрироваться только те нейтроны, которые имеют скорость L/t см/сек. Все другие нейтроны, вылетающие из источника, попадут на детектор в течение «мертвого» времени, когда он закрыт.

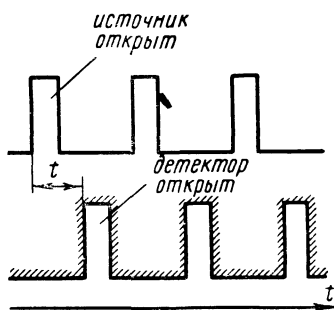


Рис. 79. Метод определения энергии нейтронов по времени пролета

Механические селекторы. В 1935 г. Даннингом впервые был создан механический селектор (рис. 80). Здесь нейтроны источника замедляются и пучок направляется на диски из Cd, который хорошо поглощает медленные нейтроны с $E_n < 0,3$ эв.

В двух дисках, вращающихся согласно на общей оси, прорезаны радиальные щели со сдвигом на угол φ . Легко видеть, что

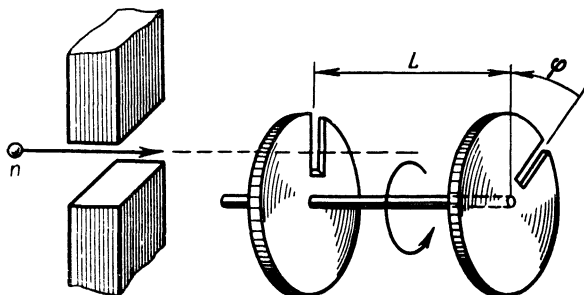


Рис. 80. Схема механического селектора

через щели во втором диске пройдут только те нейтроны, скорость которых удовлетворяет условию

$$v = \frac{2\pi nL}{\varphi}, \quad (108)$$

где n — число оборотов диска в сек, L — расстояние между диска-

ми. Изменяя n или φ , можно выделять из пучка нейтроны с различными скоростями.

Мигающий ускоритель. Идея состоит в получении пульсирующего пучка медленных нейтронов с помощью ускорителя, работающего в импульсном режиме. Это можно осуществить, например, если дугу источника ионов, питающего циклотрон, периодически включать на короткое время; с тем же периодом в циклотроне будут проходить импульсы ускоренных ионов. Поставив на их пути мишень, в которой образуются нейтроны, за счет ядерных реакций можно получить пульсирующий пучок нейтронов.

Изменяя расстояние между источником нейтронов и детектором, или время между моментами испускания импульсов нейтронов и моментами открытия детектора, можно менять скорость регистрируемых нейтронов.

Подобное устройство имеется в ОИЯИ (г. Дубна). В нем нейтроны из импульсного реактора пропускают в трубу длиной около 600 м, в конце которой имеется заслонка, открывающаяся согласовано с реактором, но с определенным запаздыванием.

Метод пространственного разделения нейтронов по энергиям.

Кристаллический спектрометр. Одним из наиболее ярких доказательств двойственной природы материи явилась дифракция медленных нейтронов на кристаллах. Согласно соотношению де Бройля длина волны λ , соответствующая частице с массой m , движущейся со скоростью v , равна $\lambda = \hbar/mv$. Для нейтрона с энергией E

$$\lambda = \frac{\hbar}{\sqrt{2mE}}.$$

Подставив значение массы нейтрона, получим (измеряя E в эв):

$$\lambda = \frac{10^{-27}}{\sqrt{2 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24} \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} E}} = \frac{4,5 \cdot 10^{-10}}{\sqrt{E}}.$$

Чтобы можно было наблюдать дифракцию нейтронов на кристаллах, длина волны нейтрона должна быть порядка периода пространственной решетки ($\sim 10^{-8}$ см). Такая длина волны соответствует энергии нейтронов меньше 100 эв. Дифракция медленных нейтронов на кристаллах представляет большой интерес, так как появляется возможность определять межатомные расстояния независимо от числа орбитальных электронов в атоме благодаря тому, что нейтроны рассеиваются на ядрах (при рентгеновской дифракции рассеяние происходит на электронах). Кроме того, при отражении от поверхности кристалла в заданном направлении выделяются нейтроны с определенной энергией.

Условие получения дифракционных максимумов можно найти из формулы Брегга — Вульфа и соотношения де Бройля:

$$2d \sin \theta = n\lambda = 2\pi n\lambda = \frac{2\pi n\hbar}{mv}, \quad (109)$$

где d — расстояние между соседними отражающими плоскостями кристалла, n — порядок отражения. Меняя угол θ , можно изменять энергию отраженных нейтронов. Этот результат лежит в основе действия кристаллического спектрометра для селекции нейтронов по скорости. Медленные нейтроны от интенсивного источника направляются на кристалл K (рис. 81), причем детектор D помещается таким образом, чтобы на него падал дифрагированный пучок. Для выбранного значения угла отражения θ большая часть нейтронов, попадающих в детектор, будет иметь энергию

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} \cdot \frac{n}{\sin^2 \theta}. \quad (110)$$

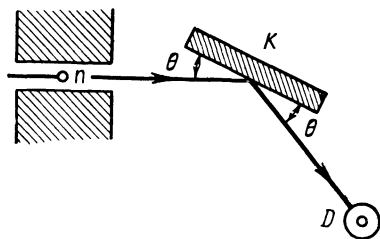


Рис. 81. Схема кристаллического спектрометра для селекции нейтронов по скорости

Недостатком метода является то, что n может принимать бесконечное множество значений $n = 1, 2, 3, \dots, n$, в зависимости от этого будут получены нейтроны различных энергий. Однако интенсивность отраженных нейтронов падает с ростом n (тепловое движение атомов нарушает условие когерентности для нейтронов с меньшей длиной волны).

Угол θ сильно уменьшается с ростом v и ограничивает верхний предел скорости, которая может быть измерена. Практически при помощи этого метода можно выделять нейтроны с энергией от 0,01 до 100 эв.

Получение нейтронов очень малых энергий (холодных). Если пропускать тепловые нейтроны через порошок графита, состоящего из большого числа случайно ориентированных кристаллов, то нейтроны будут испытывать дифракцию с хаотическим пространственным расположением максимумов. Нейтроны будут отражаться от одного кристалла к другому и лишь немногие выйдут из графита.

Существует предельная скорость, ниже которой нейтроны не будут испытывать дифракцию в данном кристалле. Это соответствует случаю, когда $\theta = 90^\circ$, а $\sin \theta = 1$ (считаем, что $n = 1$). Соответствующая скорость нейтронов равна

$$v_{\text{мин}} = \frac{\pi \hbar}{md},$$

где d — максимальный промежуток между отражающими плоскостями, равный в кристаллах графита $3,4 \cdot 10^{-8}$ см.

Не испытывающие дифракцию нейтроны с меньшими скоростями будут проходить сквозь материал. Таким образом, графит играет роль фильтра, который задерживает все тепловые нейтроны со скоростями, превышающими $v_{\text{мин}}$. Ей соответствует энергия

$$E_{\text{мин}} = \frac{1}{2} mv_{\text{мин}}^2 \approx 0,0018 \text{ эв.}$$

С помощью такого фильтра получают поток «холодных» нейтронов с температурой $T = 20^\circ\text{K}$.

Применение ядерных излучений при исследовании горных пород.

При решении различных задач геологии, инженерной геологии и гидрогеологии находят широкое применение методы радиоактивного каротажа (РК) скважин, предложенные впервые в 1941 г. Б. Понтекорво.

Исследования горных пород с помощью ядерных излучений проводятся при разведке и разработке месторождений газа, нефти и других полезных ископаемых. Используя радиоактивный каротаж, можно определить тип пород и границы их залегания на различных глубинах, а также получать характеристики пластов — плотность и проницаемость породы, насыщенность нефтью или газом, положение разделительных границ между водой и нефтью и т. п.

Для проведения радиоактивного каротажа пользуются обычно γ -лучами и нейтронами, так как они обладают большой проникающей способностью и благодаря этому можно обследовать разрез горных пород через стальную колонну.

Метод радиоактивного каротажа, основанный на измерении интенсивности рассеянного в скважине и породах γ -излучения от какого-либо источника γ -квантов, помещаемого в прибор вместе с индикатором, называется гамма-гамма-каротажем (ГГК). Источниками γ -излучения обычно служат препараты Ra, радиоактивного изотопа Co и др. Между источником и индикатором излучения помещается свинцовый фильтр, который поглощает γ -лучи из источника и этим препятствует прямому попаданию их в индикатор.

Информация об интенсивности рассеянного в породе γ -излучения, регистрируемого индикатором, передается на поверхность земли по кабелю, соединяющему прибор с наземной частью аппаратуры, которая записывает кривые зависимости интенсивности от глубины (диаграммы ГГК). Рассеяние и поглощение γ -лучей в основном определяется плотностью среды, поэтому данные ГГК используются при определении пористости горных пород и при определении содержания в них некоторых тяжелых элементов. Особенно ценным оказалось применение ГГК на угольных месторождениях, так как угольные пласты обладают аномально малой плотностью и хорошо выделяются на диаграммах ГГК.

Еще более полную информацию о свойствах горных пород можно получить, используя в качестве первичных частиц нейтроны. Применяется несколько вариантов нейтронного каротажа: нейтрон-нейтронный каротаж (ННК); нейтронный гамма-каротаж (НГК), импульсный ННК и др.

В первых двух вариантах в скважину опускается источник быстрых нейтронов (обычно радиево-бериллиевый или полониево-бериллиевый) и счетчик нейтронов или γ -квантов. Между ними помещается фильтр из бора с парафином или свинца для того, чтобы излучение источника не попало в счетчик. При ННК-каротаже используется способность нейтронов особенно эффективно замедляться в водородсодержащих средах. Нейтроны, испускаемые источником, попадают в горные породы и тем скорее замедляются в них, чем больше они содержат водорода. Замедленные — тепловые и надтепловые — нейтроны регистрируются пропорциональным счетчиком, наполненным BF_3 . Так как водород находится в основном в жидкостях, воде или нефти, заполняющей поровое пространство, то показаниями счетчика при методе ННК пользуются для оценки пористости пород и подсчета нефти в пластах. Нефть от воды можно отличить благодаря тому, что в воде имеется много солей, поглощающих нейтроны. В нефти же они практически отсутствуют.

Помимо этого, метод ННК привлекается для поисков и разведки в разрезах и скважинах элементов с высоким эффективным сечением поглощения нейтронов, таких, например, как бор, и др.

При НГК измеряется интенсивность γ -квантов, возникающих при захвате нейтронов ядрами породы. НГК также применяется для определения пористости

пород и их насыщенности нефтью. Наличие хлора в составе солей, растворенных в воде, сильно увеличивает интенсивность γ -излучения и позволяет определять положение водонефтяного контакта. НГК используется также для поисков и разведки таких элементов, как Cl , Al , Mn и др.

При импульсном нейтрон-нейтронном каротаже (ИННК) измеряется зависимость интенсивности тепловых нейтронов в породе от времени, прошедшего после прохождения импульса быстрых нейтронов источника. Регистрируемая интенсивность нейтронов сильно зависит от времени жизни тепловых нейтронов в породе. А эта величина в свою очередь связана с минерализацией пласта. Используя ИННК, удалось получить десятикратное различие в показаниях счетчика при переходе от нефти к воде в районах с высокой минерализацией воды.

Перечисленные методы радиоактивного каротажа не исчерпывают всех средств, которые находят все возрастающее практическое применение в геологии.