

бенности сложна для ускорителей ионов, где скорость основной волны должна возрастать по длине волновода в строгом соответствии с увеличением скорости ионов (скорость электронов, разогнанных до энергии в несколько мегаэлектронвольт, практически постоянна, так как ничтожно отличается от скорости света).

Выброс частиц из линейных ускорителей происходит в такт с подаваемыми в волновод импульсами напряжения.

Ускорители электронов работают на сантиметровых или дециметровых волнах.

Протонные ускорители могут работать на метровых волнах. Протонный ускоритель, построенный в 1948 г. Калифорнийским университетом в Беркли, питается 23-импульсными генераторами на триодах (при частоте 200 *Мгц*) с мощностью импульса в 1,5 млн. *вт*. Он имеет длину 12,2 м и диаметр около 1 м. Протоны подаются в этот аппарат, ускоренные генератором Ван-дер-Граафа до 4 *Мэв*, и выходят из ускорителя с энергией 32 *Мэв*.

Линейный ускоритель протонов в Харуэлле (Англия) рассчитан на ускорение протонов до 600 *Мэв* с большой интенсивностью протонного пучка (несколько миллиампер, а не микроампер, как в других установках).

Средняя напряженность ускоряющего электрического поля в линейных ускорителях приблизительно пропорциональна корню квадратному из мощности, вводимой на единицу длины. В соответствии с этим на каждом метре длины линейного ускорителя относительно небольшой мощности электроны или протоны приобретают ускорение примерно 3—6 *Мэв*, а в ускорителях очень большой мощности до 8—15 *Мэв* на метр пробега.

### § 107. Лабораторные источники нейтронов. Замедлители нейтронов в ядерных реакторах

В лабораториях для получения нейтронов чаще всего пользуются радио-бериллиевым источником: какую-либо радиевую соль в количестве 200 *мг* чистого радия смешивают с 1 *г* бериллия и смесь помещают в запаянную трубочку. Такой источник в результате бомбардировки ядер бериллия альфа-частицами, возникающими при распаде радия, дает около 2 млн. нейтронов в секунду, которые проходят через стенки трубки. В радио-бериллиевой смеси проникновение  $\alpha$ -частицы в ядро бериллия  $\text{Be}^9$  вызывает выброс нейтрона из образовавшегося промежуточного ядра, которое после этого превращается в ядро изотопа углерода  $\text{C}^{12}$ . Превращение  $\text{Be}^9 + \alpha \rightarrow \text{C}^{12} + n$  сопровождается выделением энергии 5,5 *Мэв*. Так как среди продуктов распада радия имеются такие, которые испускают  $\alpha$ -частицы с энергиями вплоть до 7,7 *Мэв*, то получающиеся нейтроны могут иметь энергию до 13,2 *Мэв*.

Для создания источников «монохроматических» нейтронов (т. е. пучков нейтронов с одинаковой энергией) используют ядерные превращения, вызываемые  $\gamma$ -лучами. Так, облучение бериллия  $\gamma$ -лучами, испускаемыми ядрами радия, дает нейтроны с энергиями 0,12 и 0,50 Мэв (при этом ядро бериллия  $\text{Be}^9$ , поглотившее  $\gamma$ -фотон, испустив нейтрон, превращается в ядро изотопа бериллия  $\text{Be}^8$ ). Облучение бериллия  $\gamma$ -лучами мезатория дает нейтроны с энергиями 0,16 и 0,88 Мэв. Облучая теми же  $\gamma$ -лучами мезатория тяжелую воду, получают нейтроны с энергией 0,22 Мэв (при этом дейтрон под действием  $\gamma$ -фотона с энергией  $h\nu=2,2$  Мэв распадается на нейтрон и протон).

Описанные источники нейтронов обычно устраивают, помещая в центре ампулы крупинку радиоактивного вещества, излучающего  $\gamma$ -лучи, и окружая эту крупинку бериллием, тяжелой водой или другим веществом, которое служит облучаемой «мишенью».

Для получения нейтронов с большой кинетической энергией применяют облучение мишеней пучками искусственно ускоренных протонов и дейтронов. Мишенями служат чаще всего бериллий, литий, алюминий и лед тяжелой воды (лед тяжелой воды наносят на металлическую подкладку, которую при бомбардировке мишени интенсивно охлаждают жидким воздухом). Для ускорения протонов и дейтронов пользуются аппаратами, описанными в предыдущих параграфах. Большие фазотроны при бомбардировке мишеней протонами дают нейтроны с энергией в сотни мегаэлектронвольт. Когда для опытов требуется большая корпускулярная плотность потока нейтронов при их энергии порядка нескольких мегаэлектронвольт или десятков мегаэлектронвольт, то облучение мишеней производят пучками протонов и дейтронов, ускоренных в циклотронах (так как плотность ионного тока, создаваемого большими циклотронами, несравненно больше плотности тока, создаваемого другими аппаратами).

Наиболее мощными источниками нейтронов являются ядерные реакторы. В них плотность потока составляет  $10^9 \sim 10^{12}$  нейтронов в секунду на  $1 \text{ см}^2$  на каждый киловатт (в активной зоне реакторов средней мощности).

Для действия ядерных реакторов (§ 118) весьма важным процессом является замедление нейтронов до небольшой скорости движения. Нейтроны с кинетической энергией, измеряемой миллионами электронвольт и не меньшей той величины, при которой они вызывают деление ядер  $\text{U}^{238}$  (порядка 1 Мэв), называют *быстрыми* нейтронами. Все нейтроны с меньшими значениями энергии называют *медленными* нейтронами. Из них нейтроны с совсем малыми кинетическими энергиями, порядка 0,01—0,02 эв и меньше, т. е. с энергиями, которые характерны для теплового движения частиц малой массы, называют *тепловыми* нейтронами.

## Скорость нейтронов при разных энергиях

Энергия . . . . .	52,5 Мэв	1 Мэв	0,1 Мэв	0,01 Мэв	10 эв	0,025 эв
Скорость в км/сек	100 000	13 800	4 380	1 384	43,75	2,19

При некоторых, характерных для разных атомных ядер значениях энергии, чаще всего порядка 0,1—100 эв, поглощение нейтронов ядрами, в том числе ядрами урана  $U^{238}$ , оказывается аномально большим. При взаимодействии нейтронов с ядрами  $U^{238}$  такое аномально большое поглощение наблюдается, когда энергия нейтронов близка к 7 эв. Поглощение нейтронов становится весьма малым при энергиях, несколько больших или несколько меньших, чем эти характерные значения энергий. Поэтому такие случаи поглощения нейтронов называют *резонансным поглощением*.

В ядерных реакторах используется уран, состоящий из двух изотопов:  $U^{238}$  и  $U^{235}$ . Как было сказано выше (§ 95),  $U^{238}$  делится только при поглощении быстрых нейтронов, причем деление не является единственным процессом, который может происходить при поглощении быстрого нейтрона ядром. Более того, вероятность деления оказывается малой величиной в сравнении с вероятностями других процессов (радиационного захвата и неупругого рассеяния). Изотоп  $U^{235}$  может делиться уже при поглощении тепловых нейтронов, причем вероятность этого процесса велика. Деление ядра сопровождается выбросом двух-трех (в среднем около 2,5) быстрых нейтронов. Деление ядра урана  $U^{235}$  происходит и при поглощении быстрого нейтрона, но захват быстрого нейтрона ядром несравненно менее вероятен, чем захват теплового нейтрона. Вероятность захвата тепловых нейтронов ядрами  $U^{235}$  столь велика в сравнении с вероятностью захвата быстрых нейтронов теми же ядрами и ядрами  $U^{238}$ , что, несмотря на очень большое процентное преобладание ядер  $U^{238}$ , размножение нейтронов в ядерном реакторе на природном уране происходит в основном вследствие деления ядер  $U^{235}$  под действием тепловых нейтронов. Поэтому *конструкция ядерного реактора должна обеспечивать замедление нейтронов до тепловых скоростей с возможно меньшей потерей числа нейтронов в процессе их замедления*.

Замедление нейтронов происходит при их столкновениях с атомными ядрами. Эти столкновения могут быть *упругими* или *неупругими*. Неупругие столкновения могут происходить, когда энергия нейтрона достаточна велика, чтобы привести ядро в возбужденное состояние. При энергиях нейтрона в сотни мегаэлектронвольт неупругие соударения нейтронов с ядрами быстро приводят к понижению энергии нейтронов до величин порядка 0,5 Мэв. При меньших энергиях нейтрона основную роль в замедлении играет рассеяние их энергии в упругих соударениях с атомными ядрами. Это рассеяние энергии происходит тем быстрее, чем меньше различие масс нейтрона и частицы, с которой он сталкивается. Из законов

классической механики следует, что доля кинетической энергии, передаваемой при центральном ударе телом массы  $m$  телу массы  $M$ , равна

$$\frac{\Delta E}{E} = 4 \frac{m}{M} \left( \frac{M}{M+m} \right)^2.$$

Когда масса ядра  $M$  во много раз превосходит массу нейтрона  $m$ , то доля кинетической энергии нейтрона, отдаваемой ядру при соударении с ним, мала. Так, сталкиваясь с ядром свинца, нейтрон передает ему менее 2% своей энергии. При каждом соударении с ядром легкого элемента нейтрон отдает этому ядру около 10—40% своей энергии (для ядер азота 25%). При соударении с дейтоном нейтрон отдает ему почти 90% своей энергии, а при соударении с протоном — всю энергию.

Соударения нейтронов с электронами не приводят к заметному уменьшению энергии нейтрона из-за большого различия в массах; согласно вышеприведенному выражению энергия нейтрона уменьшается в этом случае только на 0,2%.

В связи со сказанным в качестве *замедлителей нейтронов* до тепловых скоростей применяют чаще всего водородсодержащие вещества (воду, парафин) и графит. Быстрые нейтроны с энергией порядка 1 Мэв замедляются в парафине до тепловых скоростей (до энергий в сотые доли электронвольта) в среднем после 17 ядерных соударений, что занимает время менее одной стотысячной доли секунды. По истечении одной микросекунды энергия быстрых нейтронов, попавших в парафин, уменьшается уже в миллион раз.

В графите после 10 соударений с ядрами углерода энергия нейтронов уменьшается в 10 раз. Замедление нейтрона от энергии порядка 1 Мэв до тепловых скоростей (до 0,025 эв) в графите происходит в среднем после 110 его соударений с ядрами углерода.

Когда для получения тепловых нейтронов пользуются ампулами с радио-бериллиевой смесью, то помещают такую ампулу в парафин; парафин применяют также для замедления нейтронов, полученных при облучении мишеней ионами, ускоренными в циклотронах и других аппаратах.

Но парафин и другие водородсодержащие вещества (точнее, вещества, содержащие легкий изотоп водорода) не всегда являются подходящими замедлителями нейтронов. Дело в том, что при столкновении медленных нейтронов с протонами в значительном числе случаев происходит *захват нейтрона протоном* с образованием дейтона. Таким образом, при замедлении нейтронов протонсодержащими веществами число замедляемых нейтронов существенно уменьшается. Поэтому, когда замедление нейтронов проводят не для исследования свойств медленных нейтронов, а для возможно более полного использования медленных нейтронов в вызываемых ими ядерных реакциях, то во избежание бесполезной потери нейт-

ронов (потери, которая способна расстроить действие ядерного реактора) в качестве замедлителей применяют *вещества, не поглощающие нейтроны*. Для ядерных реакторов лучшим замедлителем нейтронов является *тяжелая вода*; но вследствие ее дороговизны в реакторах вместо тяжелой воды часто применяют *графит*.

В помещенной ниже таблице указаны свойства важнейших замедлителей нейтронов. Решающую роль играет *коэффициент замедления*, указывающий, во сколько раз эффект замедления превышает поглощение нейтронов. При 70—100 соударениях с ядрами лития и бора нейтроны замедляются до тепловых скоростей (т. е. быстрее, чем в графите), но ядра лития, бора, кадмия отличаются исключительно большим поглощением нейтронов, и поэтому для них коэффициент замедления ничтожно мал.

Замедляющие свойства легких ядер

Вещество	Число столкновений, необходимое для замедления нейтронов до тепловых скоростей	Коэффициент замедления
Вода (и водород) . . .	18	66
Бериллий . . . . .	86	160
Углерод . . . . .	114	169
Кислород . . . . .	150	487
Тяжелая вода . . . . .	35	5820

В ядерных реакторах урановые стержни опускают в тяжелую воду или в графитовую массу, причем объем этих замедлителей нейтронов путем расчета и экспериментов выбирают так, чтобы имелась возможность стабилизировать процесс каскадного размножения нейтронов. Такая стабилизация наступает тогда, когда число нейтронов, ежесекундно образующихся при делении ядер, становится равным сумме чисел нейтронов, ежесекундно поглощаемых без деления ядер и выходящих из реактора наружу. Чтобы точно обеспечить и, когда нужно, изменять эту *стабилизацию процесса размножения нейтронов в реакторе*, применяют легко вводимые в реактор и выдвигаемые из него стержни, изготовленные из стали с большим содержанием веществ, сильно поглощающих нейтроны,— обычно кадмия или соединений бора. Если размножение нейтронов в реакторе почему-либо стало происходить слишком быстро, то приборы автоматического контроля немедленно вводят в реактор поглощающие нейтроны стержни, а в противоположном случае несколько выдвигают их из реактора<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Подробнее действие ядерных реакторов, их назначение и устройство пояснены в § 118.