

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВЫХОДА НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ****М. А. Бак, К. А. Петржак, Ю. Ф. Романов**

Наиболее распространёнными нейтронными эталонами являются источники, в которых бериллий облучается  $\alpha$ -частицами или  $\gamma$ -квантами естественных излучателей. Такие источники обладают сравнительно хорошей стабильностью, непрерывностью действия, компактностью и воспроизводимостью.

Основными характеристиками такого источника являются выход и нейтронный энергетический спектр. Под выходом источника принято понимать полное число испускаемых в секунду нейтронов, приходящееся на одно милликури активного вещества.

Определение абсолютного числа нейтронов представляет большой научный и практический интерес, который не ослабевает с момента открытия нейтронов до настоящего времени. Принципы существующих методов измерения числа нейтронов заключаются в регистрации вторичных процессов, вызванных нейтронами, а также в регистрации заряженных частиц или  $\gamma$ -квантов, сопровождающих испускание нейтронов<sup>1, 2, 3</sup>.

Некоторые попытки оценить нейтронный выход радон-бериллиевого источника впервые появляются уже в 1934 г. в работах Даннинга<sup>4</sup> и Ферми<sup>5</sup>.

Даннинг, исследуя энергетический спектр нейтронов по пробегам протонов отдачи, выбитых из тонкого слоя парафина, ориентировочно оценивает выход в  $1,5 \cdot 10^3$  нейтронов в секунду. Равным образом Ферми с сотрудниками, изучая радиоактивность, вызванную нейтронами в различных элементах, делают вывод, что выход примерно равен  $10^3$  нейтронов в секунду. Джекед<sup>6</sup> в том же году определил среднее число нейтронов, создаваемых одной  $\alpha$ -частицей, взаимодействующей с алюминием и бериллием. Нейтроны регистрировались в камере Вильсона по протонам отдачи. Им было найдено, что в среднем на одну  $\alpha$ -частицу радона и продуктов его распада, бомбардирующую алюминий, приходится  $1,3 \cdot 10^{-6}$  нейтронов.

Для бериллия это число увеличивается в 70 раз. На основании этих данных можно вычислить выход радон-бериллиевого источника, который получается близким к  $10^4$  нейтронов в секунду, что значительно превышает данные предшествующих работ. Из подобных измерений, выполненных в работе<sup>7</sup>, следует, что в радон-бериллиевом источнике на одно милликюри радона пришлось бы только  $10^3$  нейтронов в секунду.

В результате изучения поглощения нейтронов в парафиновых сферах различных радиусов и в различных цилиндрических слоях воды, окруженных кадмиевыми экранами, Финк<sup>8</sup> грубо оценил значение выхода радон-бериллиевого источника в  $1,4 \cdot 10^4$  нейтронов в секунду.

Если в перечисленных работах нейтронный выход находился ориентировочно и попутно, то в последующих исследованиях этому вопросу уделено особое внимание.

Одним из первых методов, не утратившим своего значения и до настоящего времени, является метод замедления нейтронов с последующим счётом медленных нейтронов. Если источник быстрых нейтронов поместить в водородосодержащую среду, то испускаемые нейтроны в результате взаимодействия с ядрами водорода будут замедляться и поглощаться. В связи с этим в замедлителе устанавливается стационарное распределение медленных нейтронов. Вид функции пространственного распределения медленных нейтронов в замедлителе определяется энергетическим спектром первоначальных нейтронов. Полное число нейтронов ( $Q$ ), испускаемых в секунду источником, равно числу нейтронов, поглощаемых в секунду во всём объёме замедлителя, т. е.

$$Q = \int_V \rho(r, \theta, \varphi) v n_H \sigma_H r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi, \quad (1)$$

где  $\rho(r, \theta, \varphi)$  — плотность медленных нейтронов в зависимости от координат  $r, \theta, \varphi$ ;  $\sigma_H$  — эффективное сечение захвата водородом медленных нейтронов скорости  $v$ , рассчитанное на одно ядро;  $n_H$  — концентрация водорода в замедлителе.

Поглощением нейтронов другими ядрами, входящими в состав замедлителя, пренебрегается. (Учёт поглощения нейтронов другими ядрами приводит к тому, что вместо  $n_H \sigma_H$  появляется  $\sum_i n_i \sigma_i$ .) Для точечного или шарообразного источника, у которого испускание нейтронов изотропно, это выражение приобретает вид

$$Q = 4\pi \int_0^{\infty} \rho(r) v n_H \sigma_H r^2 dr. \quad (2)$$

Если положить, что эффективное сечение захвата медленных нейтронов водородом подчиняется закону  $\sigma_{\text{H}} = \sigma_{0\text{H}} \frac{1}{v}$ , то подинтегральная функция не будет зависеть от  $v$ . Тогда

$$Q = 4\pi n_{\text{H}} \sigma_{0\text{H}} \int_0^{\infty} \rho(r) r^2 dr. \quad (3)$$

Регистрируя нейтроны каким-либо детектором и измеряя интенсивность вторичных процессов, можно построить зависимость числа регистраций  $N(r)$  от расстояния.  $N(r)$  будет пропорционально плотности  $\rho(r)$ , если детектор не искажает нейтронное распределение.

$$Q = 4\pi n_{\text{H}} \sigma_{0\text{H}} \int_0^{\infty} \frac{N(r) r^2}{\sigma_{\text{д}} v B} dr = 4\pi \frac{n_{\text{H}} \sigma_{0\text{H}}}{B \sigma_{\text{д}} v} \int_0^{\infty} N(r) r^2 dr, \quad (4)$$

если сечение захвата нейтронов детектором  $\sigma_{\text{д}}$  также подчиняется закону  $\frac{1}{v}$ . Постоянная  $B$  пропорциональна количеству вещества детектора и зависит от специфики счёта вторичных процессов, вызванных нейтронами.

Следовательно, метод требует определения абсолютной эффективности детектора и знания отношения эффективных сечений захвата медленных нейтронов замедлителем и детектором. Значение интеграла определяется путём измерения  $N(r)$  на разных расстояниях от источника. Практически интегрирование производится графическим методом в связи с тем, что аналитический вид функции распределения  $N(r) r^2$  не известен.

Принцип этого метода предложили в 1936 г. Амальди и Ферми<sup>9</sup>. Поместив радон-бериллиевый источник в большой сосуд с водой, они определили пространственное распределение тепловых нейтронов. Детектором служила родиевая фольга, заэкранированная с одной стороны кадмием. Их методика вычисления нейтронного выхода не вполне соответствовала вышеприведённому описанию, а предполагала знание многих постоянных, связанных с процессами замедления и захвата нейтронов и с  $\beta$ -счётом радиоактивного родия. Они нашли, что выход радон-бериллиевого источника равен  $2,7 \cdot 10^4$  нейтронов в секунду. Амальди, Хафстад и Тюв<sup>10</sup> в 1936 г. повторили этот опыт, несколько усовершенствовав технику  $\beta$ -счёта. Они пришли к выводу, что выход составляет  $2,5 \cdot 10^4$  нейтронов в секунду.

Беккер<sup>11</sup> впервые использовал для источника нейтронов радий и измерил число нейтронов от радий-бериллиевого источника тем же методом. Источник содержал 94,33 мг радия и 2 г бериллия.

Замедлителем являлась вода, а детектором служили серебро и родий. В предположении подобия  $\beta$ -спектра препарата  $Ux_2$   $\beta$ -спектрам серебра и родия Беккер получил, что на один миллиграмм радия приходится  $2,1 \cdot 10^4$  нейтронов в секунду.

Уокер<sup>12</sup> в 1946 г. сообщил, что им в октябре 1944 г. определено полное число нейтронов, испускаемых источником, содержащим 500 мг радия. Юз в своей книге<sup>13</sup> подробно описывает эту работу. Все нейтроны источника замедлялись и поглощались в большом баке, наполненном раствором борной кислоты. Пространственное распределение медленных нейтронов в толще раствора измерялось при помощи тонкой марганцевой фольги. Калибровка фольги производилась путём последовательного помещения её и пропорционального счётчика, наполненного трёхфтористым бором, в одно и то же поле тепловых нейтронов, созданное другим произвольным источником в парафине. Таким образом находилась плотность нейтронов, соответствующая определённой активности фольги. Предполагалось, что счётчиком фиксируются все  $\alpha$ -расщепления бора, количество которого точно известно. Уокером было получено, что источник испускает  $(5,9 \pm 0,3) \cdot 10^5$  нейтронов в секунду.

В работе<sup>14</sup> определено число нейтронов измерением пространственного распределения медленных нейтронов в воде индиевой фольгой. Помещая фольгу и камеру, электроды которой были покрыты известным слоем лития, в один и тот же поток нейтронов, авторы производили калибровку фольги. Активность индиевой фольги измерялась  $\beta$ -счётчиком, наполненным аргоном. Необходимое для расчёта отношение сечений захвата медленных нейтронов литием и водородом было взято из литературных данных. В результате получено, что источник, состоящий из 501,87 мг радия в виде бромистой соли и 2,5 г бериллия, даёт  $(3,01 \pm 0,15) 10^6$  нейтронов в секунду.

Ларсон<sup>15</sup> в 1954 г. определил нейтронный выход радий-бериллиевого источника, используя вышеописанную методику. Нейтроны детектировались двумя путями: камерой, наполненной трёхфтористым бором, по методу счёта  $\alpha$ -расщеплений бора и золотой фольгой, активность которой измерялась по методу  $\beta - \gamma$ -совпадений. Замедлителем в первом случае являлся водный раствор борной кислоты при трёх различных концентрациях, во втором случае — чистая вода. Ларсон тщательно исследовал источники возможных ошибок. Им введены поправки на поглощение нейтронов стенками камер, на возмущение нейтронного поля вблизи детектора, на поглощение медленных нейтронов самим источником. Ларсон нашёл, что источник, содержащий 250 мг радия, испускает  $(2,57 \pm 0,12) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду (детектор — борная камера) и  $(2,62 \pm 0,08) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду (детектор — золото). Окончательный результат оказывается равным  $(2,60 \pm 0,08) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

В работе<sup>16</sup> также производились измерения с радий-бериллиевым источником. Замедлителем была вода, а детектирование производилось золотом, подобно тому, как это было в работе Ларсона<sup>15</sup>. В результате найдено, что одному грамму радия соответствует  $15,53 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

В конце 1954 г. опубликована заметка Геллоуда и Хенни<sup>17</sup>. Детектируя нейтроны, замедленные в растворе борной кислоты, эмульсией, содержащей ядра бора, они определили, что на 1 г радия приходится  $(1,5 \pm 0,07) \cdot 10^7$  нейтронов в секунду. Их источник содержал 47,29 мг радия.

Панет, Глюкауф и Лолейт<sup>18</sup> в 1936 г. разработали так называемый «гелиевый» метод. Экспериментальные условия опыта были следующие. Медный сосуд радиусом 10 см, в центре которого находился радон-бериллиевый источник, был наполнен метиловым эфиром борной кислоты  $B(OCH_3)_3$  и погружён в резервуар с водой. Гелий, накопившийся в результате многодневного облучения бора нейтронами, согласно реакции  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$  выделялся и количественно определялся с помощью специально разработанной техники. Присутствие гелия обнаруживалось сначала качественно — спектроскопически. Методика их микрохимического анализа позволяла определить количество гелия порядка  $10^{-7}$  см<sup>3</sup> (при нормальных условиях). Зная длительность облучения, можно подсчитать выход нейтронов. Он оказывается равным  $6,7 \cdot 10^8$  нейтронов в секунду. Однако в опыте не была учтена часть нейтронов, выходящая за пределы сосуда и не поглощённая бором. Поэтому истинный выход больше полученного. Интересно отметить, что в более ранней работе<sup>19</sup>, основанной на этом же методе, Панет и Лолейт получили, что выход превышает 3000 нейтронов в секунду.

Глюкауф и Панет<sup>20</sup>, облучив  $\gamma$ -лучами радона и его продуктов бериллиевую сферу радиусом 0,84 см, нашли, что количество гелия, накопившееся в бериллии, примерно в два раза больше, чем в метиловом эфире борной кислоты, т. е. имеет место реакция  $Be^9 + \gamma \rightarrow 2He^4 + n_0^1$ . Однако выход нейтронов путём выделения гелия из бериллия не определялся.

Зейдл и Гаррис<sup>21</sup> в 1947 г. развили метод определения числа нейтронов по возникновению гелия в результате реакции  $B^{10}(n, \alpha)Li^7$  с последующим сравнением эффектов, вызванных малым и большим нейтронными потоками. В водном растворе  $H_3BO_3$  и  $MnSO_4$  при облучении нейтронами радий-бериллиевого источника, помещённого в центре сосуда, накапливается гелий и  $\beta$ -активный изотоп марганца. В связи с тем, что количество гелия слишком мало для обнаружения, применялся относительный метод. Малая часть этого же раствора, запаянная в ампулу, облучалась в котле большим потоком медленных нейтронов в течение того же самого времени. Количество

гелия (около  $10^{-4}$  см<sup>3</sup> при нормальных условиях), накопившееся в ампуле, измерялось методом Панета<sup>18</sup>, а  $\gamma$ -активность раствора, находившегося в ампуле, сравнивалась с  $\gamma$ -активностью раствора, облучённого радий-бериллиевым источником. Очевидно, что отношение активностей равно отношению объёмов гелия, накопившегося в ампуле и сосуде. Введя поправку, учитывающую долю нейтронов, которая не поглощается бором, авторы получили, что источник № 38 Аргоннской лаборатории, содержащий 504 мг радия, смешанного с 3 г бериллия, даёт  $(5,5 \pm 0,4) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

Данный гелиевый метод, по существу, является некоторым видоизменением описанного выше метода определения числа нейтронов путём нахождения пространственного распределения медленных нейтронов в замедлителе. Здесь интегрирование заключено в факте накопления гелия, а определение абсолютной эффективности детектора сводится к измерению малого количества гелия.

Несколько иное видоизменение этого метода имело место в работе Нила и Шарфф-Гальдгабера<sup>22</sup>, которые определили в 1946 г. число нейтронов, испускаемых фотонейтронным источником, состоящим из 100 мг радия и 85 г бериллия. Источник помещался в центре большого сосуда с водным раствором сернокислого марганца, в котором был дополнительный поглотитель — порошок марганца. После облучения раствор тщательно перемешивался, что по сути дела являлось своеобразным интегрированием. Вначале находилась доля нейтронов, которая не захватывается поглотителем —  $R$ . Для этого при помощи большого тонкостенного  $\beta$ -счётчика измерялась активность раствора, облучённого в присутствии поглотителя и без него. Затем определялось абсолютное число нейтронов  $N_a$ , захватываемых поглотителем в единицу времени, по его  $\beta$ -активности, которая находилась путём сравнения с активностью препарата  $UX_2$ . Если в работе<sup>11</sup> предполагалось, что  $\beta$ -спектр  $UX_2$  подобен спектрам серебра и родия, то в этой работе было предположено, что он подобен спектру марганца. Полное число

испускаемых нейтронов равно  $Q = \frac{N_a}{1-R}$ . Авторы нашли,

что источник даёт  $(8,6 \pm 0,8) \cdot 10^4$  нейтронов в секунду. Это соответствует фотонейтронному выходу — 860 нейтронов в секунду.

Гаммертсфельдер и М. Гольдгабер<sup>23</sup> сравнили данный источник с радий-бериллиевым следующим методом<sup>24</sup>. Если исследуемый источник  $Q_x$  и источник, испускающий известное число нейтронов  $Q_0$ , последовательно окружать достаточно большим слоем водородосодержащего замедлителя и детектировать тепловые нейтроны на разных расстояниях от источника, то согласно выражению (3) иско-

ное число  $Q_x$  будет равно

$$Q_x = Q_0 \frac{\int_0^{\infty} N_x(r) r^2 dr}{\int_0^{\infty} N_0(r) r^2 dr}, \quad (5)$$

где  $N_x(r)$  — активность детектора тепловых нейтронов, последовательно помещаемого на разных расстояниях  $r$  от исследуемого источника быстрых нейтронов,  $N_0(r)$  — активность такого же детектора тепловых нейтронов, соответствующая источнику быстрых нейтронов —  $Q_0$ .

Выражение (5) справедливо для точечных источников быстрых нейтронов любого энергетического спектра, если детектируются тепловые нейтроны. Этим путём Гаммертсфельдер и М. Гольдгабер нашли, что выход радий-бериллиевого источника составляет  $6,8 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

Тем же методом дополнительного поглотителя определялось абсолютное число нейтронов от радий-бериллиевого источника в работе Саха и Рангана<sup>25</sup>. Источник нейтронов, помещенный в раствор сернокислого марганца, окружался равномерным слоем металлического порошка марганца. Активность порошка после облучения измерялась торцовым  $\beta$ -счётчиком, причём вводились поправки на геометрию, обратное рассеяние и самопоглощение. Активность раствора, тщательно перемешанного после облучения, измерялась длинным счётчиком. Авторы определили, что источник, содержащий 95 миллиграммов радия, испускает  $1,25 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

Алдер и Губер<sup>26</sup>, измеряя выход радий-бериллиевого источника; также использовали принцип дополнительного поглотителя, применённый в работе<sup>22</sup>. Водный раствор сернокислого марганца помещался в шарообразный сосуд диаметром 50 см, окружённый водой. Источник находился в центре сосуда. В данной работе вместо дополнительного поглотителя — порошка марганца, авторы использовали раствор сернокислого марганца при двух различных концентрациях. Раствор тщательно перемешивался, и активность его определялась с помощью специального счётчика, который градуировался следующим образом. Определённое количество раствора данной концентрации облучалось нейтронами, получающимися в результате реакции  $D(d, n)He^3$ . После облучения активность части раствора была измерена этим счётчиком, а из другой части был осаждён марганец в виде  $MnCO_3$ . Тонкий слой этого осадка помещался внутрь  $2\pi$ -счётчика, предназначенного для абсолютного измерения  $\beta$ -активности. Определив долю нейтронов, уходящих из раствора в воду, и учтя поправку на присутствие серы, авторы нашли, что исследуемый источник, содержащий 96,49 мг радия, испускает  $(6,10 \pm 0,45) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

Для определения нейтронного выхода можно использовать нейтронный генератор типа  $D(d, n)He^3$ . Энергия нейтронов, образующихся при этой реакции, практически не зависит от их угла вылета, если энергия дейтонов близка к 100 кэв. В связи с этим оказывается возможным, определив сечение рассеяния нейтронов на некоторых лёгких ядрах, найти число испускаемых этим генератором нейтронов методом счёта ядер отдачи.

Ладенбург и Каннер<sup>27</sup> в 1937 г. сопоставили выход радий-бериллиевого источника и источника, в котором нейтроны получаются в результате бомбардировки дейтонами тяжёлого льда. Быстрые нейтроны регистрировались при помощи ядер отдачи в ионизационной камере, наполненной либо азотом, либо кислородом. Определив эффективное сечение рассеяния этих нейтронов ядрами сжиженного азота и кислорода, они нашли, что на один микроампер дейтонного пучка энергии 100 кэв приходится  $2,3 \cdot 10^5$  нейтронов в секунду. Этот результат получен в предположении изотропного распределения нейтронов, образующихся от реакции  $D(d, n)He^3$  при данной энергии дейтонов. Сравнивая полученное количество нейтронов с испускаемым радий-бериллиевым источником методом детектирования медленных нейтронов, они нашли, что выход составляет  $6 \cdot 10^3$  нейтронов в секунду.

Известно, что введение нейтронного источника в работающий реактор повышает мощность реактора, а, с другой стороны, введение поглотителя уменьшает его мощность, так что, помещая внутрь реактора эталонируемый источник и поглотитель, можно добиться первоначальной мощности. В результате такого уравнивания мощности можно найти количество нейтронов, испускаемых источником, измеряя абсолютную активность поглотителя. В данном методе нет особой необходимости осуществлять абсолютное уравнивание двух противоположно-действующих эффектов в связи с тем, что они относительно малы и линейны. С целью увеличения точности метода производится перемещение источника в реакторе от центра к поверхности и обратно. В работе Литлера<sup>28</sup> был применён этот метод. Поглотителями являлись натрий и фосфор, абсолютная активность которых измерялась методом совпадений. По измерениям автора, источник, содержащий 1290 мг радия в виде сульфата и 12 г бериллия, испускает  $9,3 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду. Метод позволяет произвести измерения с точностью в 4,5%, однако абсолютное число испускаемых нейтронов должно быть порядка  $10^7$  нейтронов в секунду, т. е. источник должен содержать не менее одного грамма радия.

В ряде работ имеются отдельные указания на значения выходов, полученных некоторыми авторами без описания методики исследования. Так, Гайгерл и Брода<sup>29</sup> ограничиваются указанием, что используемый ими источник в 300 мг радия в виде хлорида, смешанного с 2—3 г бериллия, давал около  $3 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.



ду. В этой же работе имеется ссылка на работу Бауэра и др.<sup>30</sup>, где получено, что одно милликюри радон-бериллия производит в секунду  $1,5 \cdot 10^4$  нейтронов. В работе Джонкера и Блока<sup>31</sup> есть ссылка на ряд исследований<sup>32, 33, 34</sup>, в которых определено, что 100 миллиграммов радия, смешанного с бериллием, испускают  $(0,9 - 1,0) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду. Литлер<sup>28</sup> ссылается на работы<sup>35, 36, 37</sup>, в которых найден выход от радий-бериллиевого источника, равный  $(1,1 - 1,6) \cdot 10^4$  нейтронов в секунду. В работе<sup>38</sup> найдено, что радий-бериллиевый источник, содержащий 500 мг радия и 5 г бериллия, испускает  $(5,85 \pm 0,76) \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

В послевоенные годы появились работы, в которых исследовались источники других типов.

В работе Бретчера, Кука и др.<sup>39</sup>, опубликованной в 1949 г., описана методика изготовления источника, в котором радий химически введён в состав кристаллического соединения  $\text{RaBeF}_4$ . Образование нейтронов здесь происходит не только за счёт реакции  $\text{Be}^9(\alpha, n)\text{C}^{12}$ , но и за счёт реакции  $\text{F}^{19}(\alpha, n)\text{Na}^{22}$ . Присутствие четырёх атомов фтора в молекуле делает заметным эффект второй реакции. Согласно относительным измерениям 1 г  $\text{RaBeF}_4$  даёт в среднем  $1,84 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду. Надо отметить, что отношение количества атомов бериллия к количеству атомов радия в «смешанном» радий-бериллиевом источнике порядка 200:1, а в этом источнике равно 1:1, выход же только в 4—6 раз меньше. Это, повидимому, объясняется увеличением вероятности встречи  $\alpha$ -частицы с ядром бериллия.

Андерсен и Фельд<sup>40</sup> исследовали относительные выходы прес-сованных источников, состоящих из смеси бромистого радия с порошком металлического бериллия. Они приводят формулу для определения выхода прес-сованных источников, согласно которой

источник даёт  $1,7 \cdot 10^4 \frac{M_{\text{Be}}}{M_{\text{Be}} + M_{\text{RaBr}_2}}$  нейтронов в секунду на 1 мг

радия, где  $M$  — массы соответствующих компонент смеси.

В работе Спинкса и Грахама<sup>41</sup> методом сравнения с эталонным источником калибровался полоний-бериллиевый источник, содержащий 2,1 кюри полония. Оказалось, что он испускает  $2 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

Крауч и Диллер<sup>42</sup> в 1953 г. предложили новый метод измерения выхода полоний-бериллиевых источников нейтронов. В связи с тем, что полоний практически не испускает жёстких  $\gamma$ -лучей, эти авторы предлагают регистрировать методом совпадения нейтроны и  $\gamma$ -лучи, сопровождающие испускание нейтронов. Предполагается регистрировать  $\gamma$ -лучи при помощи кристалла  $\text{NaI}$ , активированного таллием. Нейтроны, после замедления в водородосодержащей среде, авторы предлагают детектировать бором,

Используя задержку во времени, необходимую для замедления. Если на один нейтрон приходится известное число  $\gamma$ -квантов, то, подсчитав число совпадений  $n - \gamma$  и определив независимым образом вероятность совпадения в условиях опыта, можно найти выход источника. Метод находится в разработке, причём необходимо в первую очередь определить среднее число  $\gamma$ -квантов, сопровождающих образование одного нейтрона.

Стюартом<sup>43</sup> было измерено количество нейтронов, испускаемых источником, состоящим из 13 г плутония и 7 г бериллия. Этот источник имеет  $\gamma$ -излучение малой интенсивности, большую продолжительность жизни ( $T \sim 24\,000$  лет) и сравнительно высокий выход. Кроме того, следующий за плутонием  $\alpha$ -излучатель  $U^{235}$  имеет период полураспада  $\sim 10^7$  лет. Это делает источник хорошим эталоном. Стюартом измерялся нейтронный спектр и интенсивность источника по протонам отдачи в эмульсии. Он нашёл<sup>44</sup>, что источник даёт в секунду  $1,2 \cdot 10^6$  нейтронов, энергия которых превышает  $0,5$  Мэв, т. е. на 1 мг плутония приходится около 100 нейтронов.

Если в работах<sup>22, 23</sup> производилось абсолютное определение выхода фотонейтронного источника и последующее сравнение радий-бериллиевого источника с ним, то в нижеприведённых работах выход фотонейтронных источников находился по сравнению с уже известным выходом радий-бериллиевых источников.

Куртисс и Карсон<sup>45</sup> в 1949 г. изготовили два фотонейтронных источника, представляющих собой бериллиевую сферу диаметром 4 см, в центре которой помещался 1 г радия. Тщательность изготовления этих источников обеспечила хорошую воспроизводимость. Источники оказались отличающимися на 0,1%. Выход нейтронов, найденный методом сравнения с другим известным источником посредством длинного счётчика, наполненного газом  $BF_3$ , обогащённым изотопом  $B^{10}$ , оказался равным  $1,1 \cdot 10^3$  нейтронов в секунду на 1 мг радия.

В работе<sup>46</sup> употреблялся фотонейтронный источник, содержащий 1935 мг радия. Источник испускал  $4,17 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду, что было установлено путём сравнения с существующими радий-бериллиевыми источниками, а именно с источником № 44 Лос-Аламосской лаборатории, испускающим  $5,9 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду, с источником № 37, испускающим  $4,28 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду, и с источником II металлургической лаборатории, который даёт  $12,8 \cdot 10^6$  нейтронов в секунду.

В настоящем обзоре приведены работы, опубликованные в печати вплоть до 1955 г. и посвящённые вопросу определения абсолютного числа нейтронов, испускаемых ежесекундно нейтронными источниками. Большинство исследователей применяли, по существу, один и тот же метод, а именно метод замедления нейтронов в водородосодержащих средах с последующим детектированием

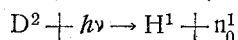
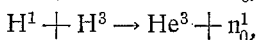
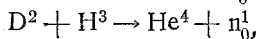
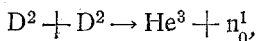
медленных нейтронов либо детектором  $\frac{1}{v}$ , либо резонансным.

Метод предполагает пространственное интегрирование распределения медленных нейтронов в замедлителе и определение абсолютной эффективности детектора. Гелиевый метод<sup>18, 21</sup> и метод дополнительного поглотителя<sup>22, 25, 26</sup> являются некоторыми видоизменениями этого метода. Точность измерения заключена в пределах 5—10 процентов.

Детектирование монохроматических нейтронов от реакции  $D(d, n)He^3$  позволяет определить число испускаемых этим генератором нейтронов<sup>27</sup>. Последующее сравнение с радий-бериллиевым источником методом детектирования нейтронов в замедлителе даёт возможность оценить выход. Точность этого метода составляет  $\sim 10\%$ .

Оригинальным является метод, основанный на влиянии источника и поглотителя нейтронов на мощность ядерного реактора<sup>28</sup>. Здесь достигается точность 4,5%.

Многообещающим является метод регистрации заряженных частиц, получающихся в результате ядерных реакций с образованием нейтрона<sup>2</sup>. К сожалению, в опубликованной литературе отсутствуют результаты применения данного метода. Такими реакциями, например, могут быть следующие:



(в первом случае возможно образование трития и протона). После определения числа заряженных частиц и соответственно числа нейтронов следует произвести сравнение с постоянно действующим источником и тем самым завершить калибровку. Можно предположить, что точность этого метода будет достаточно хорошей, особенно при фоторасщеплении дейтона<sup>2, 47</sup>.

Ниже приводится таблица, в которой сравниваются результаты всех цитируемых работ. Первый и второй столбцы включают фамилии авторов и номера литературных ссылок, третий столбец даёт год выхода работы, последующие столбцы показывают тип источника, количества радия или радона и бериллия, находящиеся в нём, вид замедлителя и тип детектора. Наконец, даётся полное число нейтронов, испускаемых источником. Последняя часть таблицы показывает нейтронный выход для источников  $Rn + Be$  и  $Ra + Be$ . Некоторые позиции таблицы остались не заполненными в связи с тем, что в соответствующих оригинальных работах не дано на них определённого ответа.

Авторы	Литературные ссылки	Год публикации работы	Тип источника	Кол. Рп (мс) Ра (мс)
1	2	3	4	5
Даннинг . . . . .	4	1934	Рп + Ве	1800
Ферми, Амальди и др. . . . .	5	1934	Рп + Ве	
Эллис и Гендерсон . . . . .	7	1934	Рп + Ве	
Джекег . . . . .	6	1934	Рп + Ве	
Панет и Лойейг . . . . .	19	1935	Рп + Ве	2200
Панет, Глюкауф, Лойейг . . . . .	18	1936	Рп + Ве	2040
Финк . . . . .	8	1936	Рп + Ве	
Амальди и Ферми . . . . .	9	1936	Рп + Ве	
Амальди, Хафстад, Тюв . . . . .	10	1937	Рп + Ве	
Беккер . . . . .	11	1937	Ра + Ве	94,33
Лагенбург и Каннер . . . . .	27	1937	Ра + Ве	
Бауэр, Феннинг и др. . . . .	30	1942	Рп + Ве	
Бауэр, Френдлик и др. . . . .	32	1943	Ра + Ве	
Бретчер, Френч и др. . . . .	33	1943	Ра + Ве	
Фриш . . . . .	34	1943	Ра + Ве	

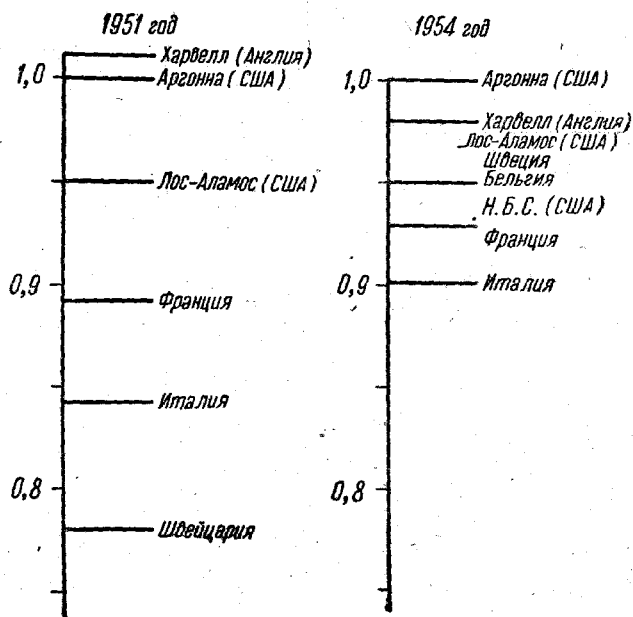
ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО ВЫХОДА НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ 679

Кол. Ве (z)	Замедлитель	Детектор	Число нейтронов	Выход	
				Rn + Be	Ra + Be
6	7	8	9	10	11
			$(2-3) \cdot 10^6$	$\sim 1500$	
				1 000	
				1 000	
		Камера Вильсона		10 000	
	B ( $\text{OCH}_3$ ) <sub>3</sub>	Бор		$> 3 000$	
	B ( $\text{OCH}_3$ ) <sub>3</sub>	Бор		$\geq 6 700$	
	Парафин	Литий		14 000	
	Вода	Родий		27 000	
	Вода	Родий		25 000	
	Вода	Родий Серебро	$2,06 \cdot 10^6$		22 000
	Парафин				6 000
				15 000	
					} 9 000—10 000

Авторы	Литератур- ные ссылки	Год опубли- кования работы	Тип источника	Кол. Rn (mc) или Ra (mg)
1	2	3	4	5
Бауэр . . . . .	35	1943	Ra + Be	
Бретчер . . . . .	36	1944	Ra + Be	
Эджню . . . . .	37	1947	Ra + Be	
Уокер . . . . .	12	1946	Ra + Be	500
Гамертсфельдер, М. Гольдгабер. .	23	1946	Ra + Be	
Зейдл и Гаррис . . . . .	21	1947	Ra + Be	504
Алдер и Губер . . . . .	26	1949	Ra + Be	96,49
Браччи, Факкини и Гермагноли . .	14	1950	Ra + Be	501,87
Гайгерл и Брода . . . . .	29	1951	Ra + Be	300
Литлер . . . . .	28	1951	Ra + Be	1290
Саха и Ранган . . . . .	25	1953	Ra + Be	95
Ларсон . . . . .	15	1954	Ra + Be	250
Ларсон . . . . .	15	1954	Ra + Be	250
Труайе и Тавернье . . . . .	16	1954	Ra + Be	502,4
Майквес и Санчес . . . . .	38	1954	Ra + Be	500
Геллоуд и Хенни . . . . .	17	1954	Ra + Be	47,29

Кол. Ве (2)	Замедлитель	Детектор	Число нейтронов	Выход	
				Rn + Ве	Ra + Ве
6	7	8	9	10	11
				}	11 000— —16 000
	Раствор $H_3BO_3$	Марганец	$5,9 \cdot 10^6$		11 800
					6 800
3	Раствор $H_3BO_3$ и $MnSO_4$	Бор Марганец	$5,5 \cdot 10^6$		11 000
	Раствор $MnSO_4$	Марганец	$6,1 \cdot 10^5$		6 300
2,5	Вода	Индий	$3,01 \cdot 10^6$		6 000
2—3					10 000
12	Реактор	Натрий Фосфор	$9,3 \cdot 10^6$		7 200
	Раствор $MnSO_4$	Марганец	$1,25 \cdot 10^6$		13 200
	Раствор $H_3BO_3$	Бор	} $2,60 \cdot 10^6$		10 400
	Вода	Золото			
	Вода	Золото	$7,80 \cdot 10^6$		15 500
5			$5,85 \cdot 10^6$		11 700
	Раствор $H_3BO_3$	Бор	$7,09 \cdot 10^5$		15 000

Из таблицы видно, что на протяжении двадцати лет исследователи проявляли неизменный интерес к данному вопросу. Если в первые годы исследований работы производились с источниками типа  $Rn + Be$ , то в последнее время работали, в основном, с источниками типа  $Ra + Be$ . Этот факт «вытеснения» радона радием говорит о стремлении исследователей работать с достаточно стабильными во времени источниками. Таблица показывает, что значения выходов источников в пределах одного и того же типа значительно отличаются друг от друга. Это объясняется рядом причин



Значения интенсивности одного и того же источника, полученные в результате измерений в различных лабораториях и выраженные в долях значения, найденного в Аргоннской лаборатории.

главными из которых являются нестандартность технологии изготовления источников и степени чистоты исходных продуктов. В связи с этим нейтронный выход не может быть одинаковым для разных источников и не может являться критерием правильности измеренного числа испускаемых источником нейтронов.

В последние годы в ряде стран произведены сравнительные измерения одних и тех же источников с целью контроля надёжности различных методов количественного определения нейтронных выходов. На основании этих относительных измерений Юэ<sup>13,47</sup> построил диаграмму (см. рисунок), показывающую значения полной



интенсивности одного и того же источника, полученные в результате измерений в различных лабораториях и приведённые к значению, полученному в Аргоннской лабораторией и принятому за единицу. Для сравнения использовались следующие нейтронные эталоны: харвеллский<sup>28</sup>, аргоннский<sup>21</sup>, лос-аламосский<sup>12</sup>, итальянский<sup>14</sup>, швейцарский<sup>26</sup>, шведский<sup>15</sup> и бельгийский<sup>16</sup>. Данные о французском и одном из американских (Национальное бюро стандартов) источниках не опубликованы. Диаграмма показывает, что повторное сравнение источников привело к лучшему согласию результатов, чем подтверждается надёжность различных методов.

Совершенно очевидно, что в ближайшие годы будет продолжаться более детальная работа по приведению результатов соответствующих лабораторий к взаимному согласию.

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. И. А. Власов, УФН, 42, вып. 2, 169 (1951).
2. A. Wattenberg, *Ann. Rev. Nuclear Sci.* 3, 119 (1953).
3. H. H. Barschall, L. Rosen, R. F. Taschek, J. H. Williams, *Rev. Mod. Phys.* 24, № 1, 1 (1952).
4. J. R. Dunning, *Phys. Rev.* 45, 586 (1934).
5. E. Fermi, E. Amaldi, O. D'Agostino, F. Rasetti, E. Segre, *Proc. Roy. Soc.* 146, 483 (1934).
6. R. Jaeckel, *Zeits. f. Physik* 91, 493 (1934).
7. C. D. Ellis, W. J. Henderson, *Nature* 133, 530 (1934).
8. G. A. Fink, *Phys. Rev.* 50, 738 (1936).
9. Э. Амальди и Э. Ферми, УФН, 17, вып. 3, 5 (1937).
10. E. Amaldi, R. L. Hafstad, M. A. Tuve, *Phys. Rev.* 51, 896 (1937).
11. G. F. Bakker, *Physica* 4, 723 (1937).
12. R. L. Walker, *MDDC*, 414 (1946).
13. Д. Юз, Нейтронные исследования на ядерных котлах, Москва, ИЛ (1954).
14. A. Bracci, U. Facchini, E. Germagnoli, *Nuovo Cimento* 7, № 1, 882 (1950).
15. K. E. Larsson, *Arkiv för Fysik*, 7, № 4, 323 (1954).
16. A. Troyer, G. C. Tavernier, *Bull. Classe Sci. Acad. roy. Belg.* 40, 150 (1954).
17. M. Gailloud, C. Haenny, *Helv. Phys. Acta* 27, № 6, 483 (1954).
18. F. A. Paneth, E. Glückauf, H. Loleit, *Proc. Roy. Soc.* 157, 412 (1936).
19. F. A. Paneth, H. Loleit, *Nature* 136, 950 (1935).
20. E. Glückauf, F. A. Paneth, *Proc. Roy. Soc.* 165, 229 (1938).
21. F. G. P. Seidl, S. P. Harris, *Rev. Sci. Inst.* 18, 897 (1947).
22. R. D. O'Neal, G. Scharff—Goldhaber, *Phys. Rev.* 69, 368 (1946).
23. G. R. Gamertsfelder, M. Goldhaber, *Phys. Rev.* 69, 368 (1946).
24. O. R. Frisch, H. Halban, J. Koch, *Kgl. Danske Videnskab. Selskab., Math.-fys. Medd.* 15, 10 (1938).
25. H. K. Saha, L. K. Rangan, *Ind. J. Phys.* 27, № 1, 18 (1953).
26. F. Alder, P. Huber, *Helv. Phys. Acta* 22, 368 (1949).
27. R. Ladenburg, M. H. Kanner, *Phys. Rev.* 51, 1022 (1937), *Phys. Rev.* 52, 911 (1937).
28. D. J. Littler, *Proc. Phys. Soc.* 64A, 638 (1951).
29. E. Giegerl, E. Broda, *Nature* 167, 399 (1951).

30. Bauer, Fenning, Freudlich, Kowarski, Seligman, *Declass. Brit. Atomic. Energy Rep.* (1942).
31. C. C. Jonker, I. Blok, *Physica* **15**, № 11—12, 1032 (1949).
32. Bauer, Freudlich, Kowarski, Nay, Seligman, *Publ. of the Cavendish Lab.* (1943).
33. Bretscher, Freuch, Martin, Poole, *Publ. of the Cavendish Lab. br 382.*
34. Frisch, *Publ. of the Physic. Lab. University of Liverpool*, 242 (1943).
35. S. Bauer, *British Rep.* 134 (1943).
36. E. Bretscher, *British Rep.* (1944).
37. H. M. Agnew, *MDDC*, 878 (1947).
38. F. R. Mayquer, C. Sanchez del Rio, *Anales real. soc. espan. fis. y quim. (Madrid)* **50A**, 27 (1954).
39. E. Bretscher, G. B. Cook, G. R. Martin, D. H. Wilkinson, *Proc. Roy. Soc.* **196A**, 436 (1949).
40. H. L. Anderson, B. J. Feld, *Rev. Sci. Inst.* **18**, 186 (1947).
41. J. W. T. Spinks, G. A. R. Graham, *Can. J. Research* **28A**, 60 (1950).
42. M. F. Grouch, D. E. Diller, *Bull. Am. Phys. Soc.* **28**, 1, 32 (1953).
43. L. Stewart, *Bull. Am. Phys. Soc.* **28**, 5, 23 (1953).
44. L. Stewart, *Phys. Rev.* **98**, 740 (1955).
45. L. F. Curtiss, A. Carson, *Phys. Rev.* **76**, 2412 (1949).
46. A. H. Snell, E. C. Bakker, R. L. Stenberg, *Phys. Rev.* **80**, 637 (1950).
47. D. J. Hughes, *Nucleonics* **12**, 12, 26 (1954).