
**ИСТОЧНИКИ И МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ
ЯДЕРНЫХ ЧАСТИЦ****§ 1. Вводные замечания**

1. В общих курсах физики не принято подробно останавливаться на вопросах, связанных с измерительной аппаратурой. Однако в ядерной физике вопрос о методах и возможностях измерений является принципиальным, затрагивающим фундаментальные законы физики микромира. Действительно, в мире ядер и элементарных частиц сплошь и рядом возникают ситуации, когда ту или иную величину либо нельзя измерить с нужной точностью, либо нельзя измерить вообще, так как это измерение настолько нарушит ход исследуемого процесса, что сам опыт потеряет смысл. Допустим, например, что мы захотели измерить скорость нейтрона внутри ядра. Для этого в соответствии с определением скорости полагается измерить с точностью не меньшей, чем $\Delta x = 5 \cdot 10^{-14}$ см (т. е. порядка 0,1 радиуса ядра), положения нейтрона в два близких момента времени. Но при первом измерении положения в соответствии с квантовым соотношением неопределенностей нейтрону обязательно будет передан импульс, не меньший $\hbar/(2\Delta x)$, что соответствует кинетической энергии 20 МэВ. Получив такую энергию, нейтрон либо вылетит из ядра, либо выбьет другую частицу, так что второе измерение положения нейтрона в том же ядре провести не удастся. Отсюда следует, что скорость нейтрона в ядре измерить невозможно не только существующими, но и какими бы то ни было мыслимыми приборами. С другой стороны, мы все-таки вводим понятие средней скорости нейтрона в ядре, и эта величина оказывается полезной для объяснения некоторых свойств ядра. Вводить понятие средней скорости можно, так как ее можно измерить, хотя и довольно грубо. Измерив массы нейтрона, исходного ядра и ядра-остатка (после вырывания нейтрона), мы, пользуясь связью массы с энергией (см. гл. II, § 3), получаем полную энергию нейтрона в ядре. Эта энергия равна сумме кинетической и потенциальной. Форму кривой потенциальной энергии можно определить, измеряя рассеяние нейтронов на ядре-остатке. Вычтя из полной энергии потенциальную, мы получим кинетическую энергию, а из нее и скорость. Самым слабым звеном в этой цепи является оценка средней потенциальной энергии. Эту оценку можно провести только с небольшой точностью. Лишь с этой точностью и можно говорить о средней скорости нейтрона

в ядре. В целом мы приходим к выводу, что в ядерной физике надо все время следить за тем, чтобы используемые физические величины были хотя бы в принципе доступны измерению с требуемой точностью.

Существует и другая, более важная практически причина, по которой в ядерной физике желательно знать существующую аппаратуру. В ядерной физике и особенно в физике элементарных частиц мы имеем дело с такими масштабами длин, времен и концентраций энергии, которые на много порядков отличаются от масштабов тех же величин в повседневных, привычных нам явлениях. Проникновение человека в эти новые для него области масштабов сопряжено с колоссальными техническими трудностями и требует необычайной изобретательности, большого труда и материальных затрат. Это проникновение по необходимости происходит крайне неравномерно. В одних случаях удается изучать явления в областях вплоть до $2 \cdot 10^{-15}$ см, в других, казалось бы, сходных ситуациях оказываются недоступными измерения в несравненно больших областях. Например, при изучении рассеяния протон — протон на Серпуховском ускорителе (лабораторная энергия пучка протонов равна 76 ГэВ, так что кинетическая энергия в системе центра инерции равна 10 ГэВ; см. гл. VII, § 4) можно получать сведения о структуре нуклона до расстояний порядка $\hbar c/E_{\text{СЦИ}} = 2 \cdot 10^{-15}$ см. Но рассеяние гиперона на гипероне не удастся измерить ни при каких энергиях из-за отсутствия гиперонных мишеней. Здесь даже длины, скажем, порядка 10^{-13} см оказываются недоступными. Поэтому надо хорошо знать физические принципы, используемые в приборах и установках ядерной физики, и отчетливо представлять область возможностей этих приборов и установок, для того чтобы понимать существующие границы возможностей сравнения теории с экспериментом.

2. Попробуем теперь понять, какими способами можно изучать ядра и элементарные частицы. За очень немногими исключениями, единственным способом исследования ядер и элементарных частиц является осуществление столкновений одних частиц с другими с последующей регистрацией частиц, вылетевших после столкновения. Не прибегая к столкновениям и распадам, можно изучать лишь некоторые статические характеристики ядер, такие, как спины, магнитные моменты и электрические квадрупольные моменты (см. гл. II, §§ 4, 5 и 7).

Для того чтобы изучать столкновения, надо уметь: во-первых, создавать пучки налетающих частиц достаточно высоких энергий; во-вторых, готовить мишени, содержащие ядра или частицы, с которыми происходят столкновения, и, в-третьих, регистрировать требуемое число характеристик вылетающих частиц. Для исследования распадов ядер надо уметь готовить эти ядра и опять-таки регистрировать характеристики продуктов распада. Поэтому

предметом настоящей главы являются источники и методы регистрации ядерных частиц.

Для полноты скажем несколько слов и о мишенях. Мишенями могут быть только те частицы и ядра, которые достаточно долго живут и которые могут входить в состав макроскопических тел. Поэтому список доступных мишеней четко ограничен. В него входят все стабильные и достаточно долго (примерно не менее нескольких минут) живущие ядра, а также протон и электрон. Из всех остальных ядер и частиц мишеней делать нельзя. Уже, например, о рассеянии нейтрон — нейтрон нет прямых экспериментальных данных, в то время как рассеяние нейтрон — протон и особенно протон — протон исследовано с большой полнотой в широкой области энергий (см. гл. V, §§ 3 — 5). Проблема создания методики исследования столкновений нестабильных и нейтральных частиц друг с другом еще ждет своего решения. Небольшое, но важное расширение списка возможных мишеней достигается на встречных пучках (см. § 2, п. 13).

Перечень принципиально различных типов источников невелик. Исторически первыми источниками были естественно-радиоактивные ядра, испускающие α -частицы, электроны и γ -кванты с энергиями до нескольких МэВ. Позднее в реакторах и циклотронах стали создавать большое количество искусственных радиоактивных препаратов, что дало возможность в промышленном масштабе производить радиоактивные источники с различными временами жизни и различными энергиями вылетающих частиц. Однако область энергий вылетающих частиц во всех этих источниках ограничена теми же несколькими МэВ, что заметно ниже порогов большинства ядерных реакций, не говоря уже о реакциях с элементарными частицами. Поэтому радиоактивные источники за редчайшими исключениями (например, эффект Мёссбауэра, см. гл. VI, § 6, п. 6) и сейчас применяются не для осуществления ядерных реакций, а для исследования самого явления радиоактивности и для прикладных целей.

Заряженные частицы можно разогнать по определенным траекториям комбинированным действием электрических и магнитных полей. Устройство, в котором под действием электрических и магнитных полей создается пучок заряженных частиц высокой энергии, называется *ускорителем*. В настоящее время ускорители различных типов являются практически единственными источниками заряженных частиц, используемых для осуществления ядерных реакций и реакций с элементарными частицами. В ускорителях получают пучки частиц с энергиями от нескольких МэВ до сотен ГэВ, причем верхний предел обусловлен не принципиальными трудностями, а существующим состоянием ускорительной техники. По грубой оценке технический прогресс приводит к повышению максимальной энергии ускорителя на порядок за десятилетие.

В ускорителях непосредственно ускоряются лишь стабильные заряженные частицы, входящие в состав земной коры. Поскольку основной интерес для физики представляют элементарные акты взаимодействия, то в большинстве ускорителей получают пучки протонов или электронов. Используются пучки дейтронов и α -частиц. Имеется также небольшое количество ускорителей тяжелых ионов, таких, как многократно заряженные ионы углерода, азота, кислорода и более тяжелых ядер. Решена задача создания достаточно интенсивных источников для ускорителей позитронов и антипротонов.

Пучки других частиц, как заряженных, так и нейтральных, получают, используя вторичные реакции в мишени, обстреливаемой первичным пучком. В мишени происходят реакции, в результате которых из нее вылетают новые частицы. Если этих новых частиц достаточно много, то можно изучать реакции, производимые новыми частицами при их столкновениях с другими мишенями. Этим методом на ускорителях получают вторичные пучки γ -квантов, нейтронов, пионов, каонов, антинуклонов и некоторых других частиц. Мюоны и нейтрино не генерируются во вторичных пучках. Эти частицы в ускорителях высоких энергий получают в третичных и т. д. пучках. Третичные пучки порождаются распадами нестабильных частиц вторичных пучков.

Для получения нейтронных пучков с энергиями до 14 МэВ существуют методы, не связанные с использованием ускорителей. Во-первых, исключительно мощным источником нейтронов в этой области энергии является ядерный реактор (см. гл. XI, § 3). Во-вторых, в этой же области энергий используются простые и широко доступные источники, в которых нейтроны получают в α -активном препарате за счет вторичной реакции α -частиц с ядрами примесей определенного вида (см. § 3, п. 2).

Для полноты укажем, что постоянным источником различных частиц в широчайшем диапазоне энергий (до тысяч ГэВ, а изредка и гораздо выше) являются космические лучи (см. гл. XII, § 3). Именно в космических лучах до начала пятидесятых годов в основном открывались новые элементарные частицы. Однако в космических лучах можно проводить не контролируемые эксперименты, а лишь природные наблюдения, в которых не все физические условия фиксированы с достаточной точностью. Поэтому с ростом энергий, доступных ускорительной технике, область применимости космического излучения как метода исследования ядер и элементарных частиц все больше ограничивается снизу по энергии. Кроме того, столкновения космических частиц сверхвысоких энергий происходят крайне редко и лишь на очень большой высоте. В настоящее время исследования реакций с элементарными частицами в космических лучах продолжают играть ограниченную, но важную роль как единственный источник информации о взаимодействиях частиц при энергиях выше ускорительных.

Таким образом, все существующие типы источников элементарных частиц (и ядер) разделяются на: радиоактивные препараты (первичные и вторичные частицы), ускорители (первичные, вторичные, третичные пучки и т. д.), ядерные реакторы и космические лучи. Для изучения реакций сейчас используются только ускорители и реакторы. В прикладных исследованиях широко используются радиоактивные источники.

3. *Детектором*, или, что то же, *регистратором ядерных частиц*, мы будем называть устройство, дающее информацию о прохождении отдельных частиц через определенные макроскопические области пространства. Основная трудность регистрации состоит в том, что эффект воздействия отдельной частицы на вещество с макроскопической точки зрения крайне мал. Наиболее заметным эффектом такого рода является ионизация вещества заряженной частицей. Поэтому работа подавляющего большинства существующих типов детекторов заряженных частиц основана на принципе использования ионизационной способности частиц. В немногих типах детекторов используется электромагнитное излучение заряженных частиц в среде. Действие нейтральных частиц на вещество слишком ничтожно для того, чтобы их можно было регистрировать непосредственно. Поэтому нейтральные частицы регистрируются по вторичным процессам: исследуемые нейтральные частицы порождают заряженные, которые регистрируются по их ионизирующему действию.

Из-за малости ионизационного действия отдельной частицы для регистрации необходимо высокоэффективное усиление. Поэтому в ядерной радиотехнике широко используются импульсные радиотехнические усилители. Но на первой ступени усиления обычно радиотехнические усилители непригодны. В таких случаях используются усилители, главной частью которых является то или иное неустойчивое состояние физической системы: переохлажденный пар, перегретая жидкость, газ в предразрядном состоянии и т. д. В этом отношении регистрационный прибор похож на заряженное ружье. Пролетающая частица, образно говоря, нажимает на спусковой крючок, высвобождая большую энергию, за счет которой и производится регистрация.

§ 2. Источники заряженных частиц и γ -квантов

1. Теория ускорителей составляет предмет не ядерной и даже не общей физики, а относится к технической физике электромагнитных явлений. Поэтому мы будем вести изложение в потребительском плане, подчеркивая главным образом, что именно можно получить от ускорителя того или иного типа.

Результатом действия ускорителя является образование пучка заряженных частиц с энергией от нескольких МэВ до десятков