

правило, используют радиоактивные источники в герметизированных ампулах. Работа с открытыми источниками разрешается только при наличии специального оборудования, например, типа камеры, изображенной на рис. 13.13. Работы с очень большими активностями проводятся в так называемых горячих лабораториях — помещениях, имеющих надежную защиту, дистанционное наблюдение и манипулирование, эффективные фильтры в системе вентиляции, разветвленную систему дозиметрического контроля.

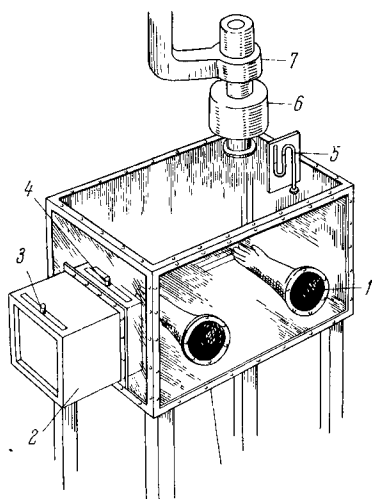


Рис. 13.13. Камера для работы с радиоактивными препаратами.

1 — отверстия с перчатками, 2 — шлюз, 3 — наружная заслонка, 4 — внутренняя заслонка, 5 — манометр, 6 — фильтр 7 — вентилятор.

## § 6. Применение радиоактивных излучений в науке и технике

1. В настоящее время научно-технические применения радиоактивных изотопов столь многочисленны и разнообразны, что об использовании их даже в какой-то одной отрасли промышленности, например в горном деле, пишутся отдельные монографии и даже учебные пособия. Поэтому мы не будем стремиться перечислить все или хотя бы все важнейшие применения методов ядерной физики,

а лишь попытаемся обрисовать круг физических идей и явлений, на которых основаны эти приложения. Этот круг оказывается довольно узким. Подавляющее большинство применений ядерных излучений основано всего лишь на четырех физических явлениях. Первое явление состоит в том, что любой радиоактивный изотоп является меченым атомом соответствующего элемента, т. е. атомом, который по своим химическим и физическим свойствам ведет себя так же, как и его собрат, но за судьбой которого можно проследить по его радиоактивности. Роль меченых атомов могут играть и атомы стабильных изотопов, изменяющие природный изотопический состав изучаемого элемента. Второе явление состоит в том, что любое радиоактивное излучение обладает определенной проникающей способностью, т. е. свойствами распространяться и поглощаться в данной среде определенным образом. Сущность третьего явления сводится к тому, что ядерные излучения, проходя через вещество, производят его ионизацию. Наконец, четвертое явление состоит в образовании наведенной радиоактивности в веществе нейтронами,

а также другими излучениями при достаточно высокой энергии последних. Соответственно все основные методы использования ядерных излучений по положенным в их основу физическим идеям делятся на четыре группы:

- а) меченые атомы (другое название — изотопные индикаторы);
- б) использование проникающей способности излучений;
- в) использование ионизирующей способности излучений;
- г) использование различных форм наведенной активности.

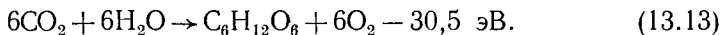
Рассмотрим по порядку возможности перечисленных методов.

2. Метод меченых атомов состоит в том, что к исследуемому элементу примешивается некоторое количество его радиоактивного изотопа. Эта радиоактивная примесь химически неотличима от основной массы элемента, но может быть обнаружена с помощью счетчика Гейгера — Мюллера или другого детектора радиоактивных излучений. В другом варианте метода в исследуемый элемент вводится стабильный изотоп, нарушающий естественный изотопный состав. Присутствие этого добавочного изотопа в дальнейшем можно установить масс-спектроскопическими методами. Так как атомы одного и того же элемента химически неотличимы друг от друга (см. гл. II, § 2, п. 3), то применение меченых атомов открывает принципиально новые возможности исследования, позволяя проследить за перемещениями и химическими превращениями атомов элемента в средах, содержащих этот элемент.

Приведем несколько примеров.

В физике только использование меченых атомов дало возможность прямого измерения коэффициента самодиффузии — процесса, в котором атомы или молекулы одного и того же вещества перемещаются друг с другом в растворе.

В биохимии меченые атомы позволили выяснить ряд важнейших моментов сложного и фундаментального для всего растительного мира процесса фотосинтеза. Раньше было известно, что результатом фотосинтеза является эндотермическое превращение в листьях растений атмосферного углекислого газа в глюкозу  $C_6H_{12}O_6$  под действием солнечного света:



Было ясно, что эта реакция идет через какие-то быстро протекающие промежуточные стадии. Но механизм этих промежуточных реакций долгие годы не поддавался прямому исследованию. Использование меченых атомов позволило перейти от догадок к экспериментальному исследованию. Так, используя воду, обогащенную изотопом  ${}^8O^{18}$  (как говорят, с кислородной меткой), установили, что кислород в реакции (13.13) выделяется из воды, а не в результате разложения  $CO_2$ , как считалось раньше. Дальнейшие сведения о механизме фотосинтеза были получены в опытах с углекислым газом, меченным по углероду изотопами  ${}^6C^{13}$  и  ${}^6C^{14}$ . В этих опытах

растение помещают в атмосферу с меченым углеродом, производят короткое освещение и затем либо просто измеряют активность разных частей растения, либо выделяют и исследуют химические соединения, содержащие меченый углерод. В результате удалось установить, в какой последовательности возникают промежуточные продукты фотосинтеза, что позволило воссоздать правдоподобную картину всего процесса.

Только методом меченых атомов можно получить информацию о скорости обмена веществ в тканях живого организма. Оказалось, что в целом ткани обновляются гораздо быстрее, чем считалось раньше. Выяснен целый ряд подробностей такого обмена. Так, с помощью радиоуглерода  ${}^6\text{C}^{14}$  было установлено, что жирные кислоты, образовавшиеся из масла, быстро усваиваются организмом, а сходные соединения из смальца и солонины имеют тенденцию откладываться в костях.

В сельском хозяйстве важно знать, в каких химических соединениях следует вносить удобряющие элементы — азот, фосфор, кальций и др. в почву, чтобы они лучше усваивались растениями. И здесь решающую роль сыграли меченые атомы, позволившие выяснить, каким путем и в каком количестве попадает в растение элемент именно из удобрения. Особенно хорошо изучено усвоение фосфора, имеющего сравнительно удобный для работы радиоактивный изотоп  ${}_{15}\text{P}^{32}$  с временем жизни 14 дней. В этих опытах было установлено, какой процент фосфора усваивается в различных условиях, что позволило дать практически полезные рекомендации по оптимальному размеру гранул суперфосфата, по глубине его внесения и т. д. Был открыт ряд совершенно новых фактов. Например, оказалось, что в определенных условиях растения могут поглощать питательные соли не только корнями, но и листьями.

Метод меченых атомов характерен крайне высокой чувствительностью. Рядовой счетчик Гейгера — Мюллера способен уверенно регистрировать активность вплоть до  $10^{-4}$  мкКи. Это соответствует  $10^{-11}$  г даже столь долго живущего изотопа, как  ${}^6\text{C}^{14}$  ( $T_{1/2} = 5570$  лет). Для короткоживущего изотопа  ${}^6\text{C}^{11}$  ( $T_{1/2} = 20,4$  мин) эта активность соответствует всего лишь  $10^{-19}$  г изотопа. Довольно высока и чувствительность масс-спектроскопических методов обнаружения стабильных изотопов. Современный серийный масс-спектрометр дает возможность обнаруживать и измерять с процентной точностью присутствие одной миллионной доли исследуемого изотопа. Такая высокая чувствительность открывает возможности использования метода меченых атомов и в тех случаях, когда важно просто проследить за судьбой очень малых количеств вещества. Например, в аналитической химии этот метод используется для определения растворимости очень мало растворимых веществ. В машиностроении метод меченых атомов широко используется для быстрого определения скорости износа подшипников в разных условиях. Для этого

в одну из трущихся поверхностей вносится радиоактивный изотоп (например,  $\beta$ -активный изотоп  ${}_{26}\text{Fe}^{59}$  в сталь), после чего измеряется радиоактивность либо другой трущейся поверхности, либо (что обычно удобнее) смазочного масла. Такой метод позволяет резко сократить время испытаний на износ при повышении точности и подробности информации об этом процессе. Раньше о скорости износа часто судили по величине трения. С помощью метода меченых атомов установлено, что износ далеко не всегда пропорционален трению. Бывает, что при переходе от одной смазки к другой трение уменьшается в 5 раз, а износ в 400 раз. А это очень важно потому, что износ является гораздо большим злом, чем трение.

Так как чувствительность метода меченых атомов обратно пропорциональна периоду полураспада используемого радиоактивного изотопа, то наиболее удобными для использования являются изотопы, живущие не слишком долго. Но очень короткие периоды полураспада также неудобны, так как короткоживущий изотоп почти весь распадается за время опыта, а то и за время между изготовлением изотопа и началом опыта. Оптимальными являются времена около года. Допустимы отклонения от этой величины на несколько порядков в обе стороны. Используемые на практике радиоактивные изотопы имеют периоды полураспада от нескольких часов до десятков тысяч лет и больше. Из короткоживущих изотопов можно отметить важный для изучения износа подшипников изотоп меди  ${}_{29}\text{Cu}^{54}$  с периодом полураспада 12,8 часа. Из долгоживущих изотопов очень важен изотоп хлора  ${}_{17}\text{Cl}^{36}$  с периодом полураспада  $3,1 \cdot 10^5$  лет. Есть элементы, у которых отсутствуют радиоактивные изотопы, живущие достаточно долго, чтобы можно было пользоваться ими как мечеными атомами. К ним относятся, в частности, такие важнейшие для биологии и органической химии элементы, как кислород и азот. У кислорода наиболее долго живущий нестабильный изотоп  ${}_{8}\text{O}^{15}$  имеет период полураспада 2 минуты, а у азота — 10 минут ( ${}_{7}\text{N}^{13}$ ). Поэтому для меток по кислороду и азоту приходится использовать добавки стабильных изотопов  ${}_{8}\text{O}^{18}$  и  ${}_{7}\text{N}^{15}$ , содержание которых в природных смесях мало (меньше процента).

В настоящее время в реакторах и на специально сконструированных циклотронах в нашей стране изготовляется более полутора сотен различных радиоактивных изотопов. В большом масштабе ведется производство разделенных стабильных изотопов. Существует государственный фонд стабильных изотопов, предназначенных для выдачи во временное пользование различным научным и промышленным организациям. Как радиоактивные, так и стабильные изотопы выпускаются не только в чистом виде, но в форме самых различных химических соединений. Выпускаются химические соединения не только с одной, но и с двумя изотопными метками, такие, как углекислый натрий  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , в котором радиоактивны

изотопы натрия и углерода ( $_{11}\text{Na}^{24}$ ,  $_{6}\text{C}^{14}$ ). Наиболее употребительные изотопы, используемые в качестве меченых атомов, перечислены в табл. 13.6.

Таблица 13.6. Наиболее употребительные радиоактивные изотопы

Изотоп	Тип	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ или $E_{\beta \text{max}}$ , МэВ	Изотоп	Тип	$T_{1/2}$	$E_{\gamma}$ или $E_{\beta \text{max}}$ , МэВ
$\text{Pm}^{147}$	$\beta$	2,66 года	0,22	$\text{Se}^{75}$	$\gamma$	125 дней	0,27
$\text{Sr}^{90}$	$\beta$	2,7 года	0,61	$\text{I}^{131}$	$\gamma$	74,37 дня	0,31
$\text{Ce}^{144}$	$\beta$	284 дня	0,30	$\text{Cs}^{137}$	$\gamma$	30 лет	0,66
$\text{Ru}^{106}$	$\beta$	1 год	0,04	$\text{Cs}^{134}$	$\gamma$	2,07 года	0,79
$\text{Tl}^{170}$	$\gamma$	129 дней	0,08	$\text{Co}^{60}$	$\beta, \gamma$	5,24 года	1,33

Метод меченых атомов часто используется в сочетании с методом наведенной активности, о чем мы скажем ниже в п. 5.

В настоящее время Всесоюзное объединение «Изотоп» поставляет соответственно 1000 и 700 наименований радиоактивных и стабильных изотопов и меченных ими соединений.

3. Ионизирующие излучения, проходя через газ, делают его электропроводным. На этом свойстве основана работа нейтрализаторов статического электричества. Эти нейтрализаторы позволили решить давние наболевшие проблемы текстильной промышленности, связанные с электризацией нитей трением. Электризация нередко приводила к самовозгоранию. Особенно сильно электризуются многие синтетические волокна. Наэлектризованные нити плохо скручиваются, прилипают к разным частям машин. Никакими «доядерными» средствами решить эту задачу не удавалось. Установка же нейтрализаторов, главной частью которых является  $\alpha$ -активный плутоний  $_{94}\text{Pu}^{239}$ , либо  $\beta$ -активные тритий или прометий  $_{61}\text{Pm}^{147}$  ( $T_{1/2} = 2,6$  лет), позволила обеспечить непрерывную разрядку статических зарядов через ионизированный воздух без изменения технологии процессов. Применение нейтрализаторов не только устранило пожарную опасность, но и привело к заметному увеличению производительности различных машин (ткацких, чесальных и др.) в текстильном производстве на 3—30%. В настоящее время нейтрализаторы статического электричества составляют 13% всех поставок радиационной техники. Они широко используются в текстильной, полиграфической и других отраслях промышленности.

В медицине ионизационная способность излучений используется для радиационного разрушения злокачественных опухолей. Уже сейчас более половины больных раком молочной железы живут свыше десяти лет после комплексного хирургического и лучевого лечения.

Ионизационная способность излучений успешно используется для борьбы с некоторыми вредными насекомыми. Разработан метод,

применимый для уничтожения насекомых, спаривающихся один раз в жизни. Заключается он в том, что в зараженную местность выпускают большое количество (миллионы) насекомых-самцов, специально стерилизованных определенной дозой излучения. Эти самцы спариваются с самками, которые уже не дают потомства. В Италии этим способом удалось уничтожить фруктовую муху на большом участке острова Капри. Ряд успешных опытов большого масштаба был проведен в других странах. Метод «стерильных самцов» не универсален. Но в пределах своей применимости он превосходит метод ядохимикатов тем, что не убивает полезных насекомых и не приводит к накоплению вредных примесей в сельскохозяйственных продуктах.

Ионизация облучением используется также для увеличения числа генетических мутаций у разных растений с целью ускорения получения новых полезных сортов.

Усиленно разрабатываются методы стерилизации облучением различных пищевых продуктов, что позволяет увеличить сроки хранения картофеля и ряда других овощей.

4. Изотопные приборы, основанные на использовании проникающей способности  $\gamma$ - (реже  $\beta$ -) излучения, в настоящее время занимают более половины всех поставок радиационной техники. В основу почти всех этих приборов положен один и тот же простой принцип: счет в детекторе меняется, если меняется толщина или вид материала между детектором и источником. На основе этого принципа конструируются и выпускаются различные толщиномеры, плотномеры, уровнемеры, счетчики предметов,  $\gamma$ -дефектоскопы и многие другие приборы. На этом принципе основаны многочисленные  $\gamma$ -релейные устройства, автоматически контролирующие и регулирующие ход производственных процессов. Бета-излучение сильно поглощается веществом. Из-за непрерывности  $\beta$ -спектра (см. гл. VI, § 4, п. 4) и из-за искривления пути электронов в веществе (см. гл. VIII, § 3) разные электроны источника имеют разный пробег, от нулевого до некоторого максимального. Количество прошедших через вещество электронов довольно резко зависит от толщины слоя. Поэтому  $\beta$ -толщиномеры имеют довольно хорошую точность, но могут измерять лишь небольшие толщины. Такие толщиномеры применяются, например, для контроля за толщиной производимой фотопленки. Пленка проходит между источником и детектором. Малейшее отклонение толщины от стандартной изменяет число поглощаемых пленкой электронов, т. е. меняет скорость счета детектора. Для больших толщин используются  $\gamma$ -толщиномеры. Интересной разновидностью прибора такого типа является односторонний  $\gamma$ -толщиномер, измеряющий толщину определенного материала по величине  $\gamma$ -излучения, рассеянного назад. Такие толщиномеры применяют для контроля размеров труб на Московском нефтезаводе. Приборы, основанные на проникающей способности

$\gamma$ -излучения, особенно удобны для автоматического контроля процессов в труднодоступных для непосредственного измерения местах, например, для слежения за уровнем жидкости в закрытом сосуде с помощью радиоактивного поплавка.

В геологии сейчас одним из основных методов разведки новых месторождений нефти и некоторых других полезных ископаемых

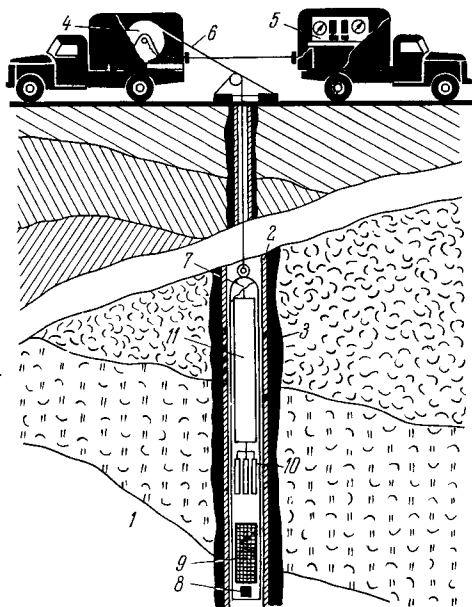


Рис. 13.14. Схема радиоактивного каротажа.

1 — пласты пород, 2 — стальная труба, 3 — цементное кольцо, 4 — лебедка, 5 — пульт управления и питания, 6 — кабель, 7 — гильза глубинного прибора, 8 — источник нейтронов или  $\gamma$ -квантов, 9 — фильтр, 10 — счетчики, 11 — усилители импульсов.

является радиоактивный каротаж скважин, основанный на различии процесса распространения нейтронов и  $\gamma$ -лучей в разных породах. Схема установки для радиоактивного каротажа приведена на рис. 13.14. В скважину помещается источник  $\gamma$ -лучей или нейтронов, выше источника — разделяющий фильтр (из свинца для  $\gamma$ -источника, из парафина — для источника нейтронов), а над фильтром — детектор. Скорость счета в детекторе зависит от свойств среды. В зависимости от источника и рода детектируемых частиц различают  $\gamma$  —  $\gamma$ -каротаж, нейтрон-нейтронный каротаж и нейтрон —  $\gamma$ -каротаж. В  $\gamma$  —  $\gamma$ -каротаже скорость счета падает с увеличением плотности окружающей породы. Поэтому этот вид каротажа называют каротажем мала плотности угольных пластов, которые поэтому хорошо идентифицируются  $\gamma$  —  $\gamma$ -каротажем. Более разнообразную, т. е. более богатую, информацию дает предложенный Б. М. Понтекорво (1941) нейтронный каротаж. Распространение нейтронов в горной породе тем хуже, чем больше в ней водорода, так как в водороде нейтроны быстро замедляются, а замедлившись, поглощаются. Водорода много как в нефти, так и в воде. Но нефть практически не содержит примесей, а в воде всегда растворена поваренная соль, ядра хлора которой энергично поглощают нейтроны с испусканием  $\gamma$ -квантов. Поэтому в нейтрон-нейтронном каротаже счет детектора более высок для нефти, чем

для воды, а в нейтрон —  $\gamma$ -каротаже — наоборот. Это дает возможность уверенно отличать нефтяные пласты от водных.

5. В методе наведенной активности главным является возбуждение в веществе вторичной радиоактивности под действием ядерных излучений. Использование этой наведенной радиоактивности развивается в двух направлениях. Первым является элементный анализ, вторым — создание меченых атомов.

Классическая методика активационного элементного анализа состоит в том, что исследуемое вещество и образец-эталон с известным количеством определяемого элемента облучают фиксированной дозой, а затем (сразу или после определенной выдержки) измеряют возникшую наведенную активность. Присутствие нужного элемента идентифицируется по виду испускаемых частиц, по их энергии и по периоду полураспада.

Наиболее широко используется активация нейтронами, так как нейтроны, особенно медленные, энергично поглощаются всеми ядрами (кроме  ${}^4_2\text{He}$ ), причем поглощение в большинстве случаев приводит к образованию  $\beta$ - (а часто и  $\gamma$ -) активных изотопов. Применяются не только медленные, но и быстрые нейтроны. В последнем случае возможен не только радиационный захват, но и другие реакции, такие, как  $(n, p)$ ,  $(n, \alpha)$ ,  $(n, d)$  и т. д. В качестве источников нейтронов используются изотопные источники, высоковольтные  $d$ - $t$ -трубки, нейтронные размножители, реакторы. Активация в мощном нейтронном потоке реактора дает возможность производить анализ с исключительно высокой точностью и обнаруживать крайне малые концентрации элементов. Разработаны методики определения концентрации путем активации в реакторе для 70 элементов с точностью от  $10^{-5}$  до  $10^{-10}\%$ . Применение изотопных нейтронных источников и разрядных трубок не дает такой точности анализа, но зато выгодно отличается относительной простотой, дешевизной, а часто и быстротой.

Для прецизионных анализов из активированного образца радиохимическими методами выделяют элемент, содержащий исследуемую активность. Однако разрушение образца часто бывает нежелательным. В этом случае проводят менее точный анализ без разрушения образца. Такие анализы осложнены тем, что в образце могут возникнуть сопутствующие активности, наведенные в других элементах. Поэтому при анализе без разрушения необходимо тщательно учесть все возможные реакции активирующего излучения со всеми изотопами каждого элемента, могущего входить в состав исследуемого вещества. Методы разделения наведенных активностей от разных изотопов разнообразны. Выбор наиболее эффективной методики часто требует немалой вдумчивости и изобретательности.

Активности, сильно различающиеся по временам жизни, разделяются тем, что короткоживущую активность измеряют немедленно, а долгоживущую — после достаточной выдержки. Для более точ-



ных измерений вклад самой долгоживущей активности, после ее измерения при больших временах, вычитается из суммарной скорости счета (см. гл. VI, § 2). Пример такого разделения по временам показан на рис. 13.15, где приведена кривая распада углекислого рубидия с примесями калия и цезия после активации нейтронами. При малых временах отделяется активность самого короткоживущего ( $T_{1/2} = 18$  мин) изотопа  ${}_{37}\text{Rb}^{88}$ . Остаточная активность четко разделяется на три ветви, соответствующие распадам

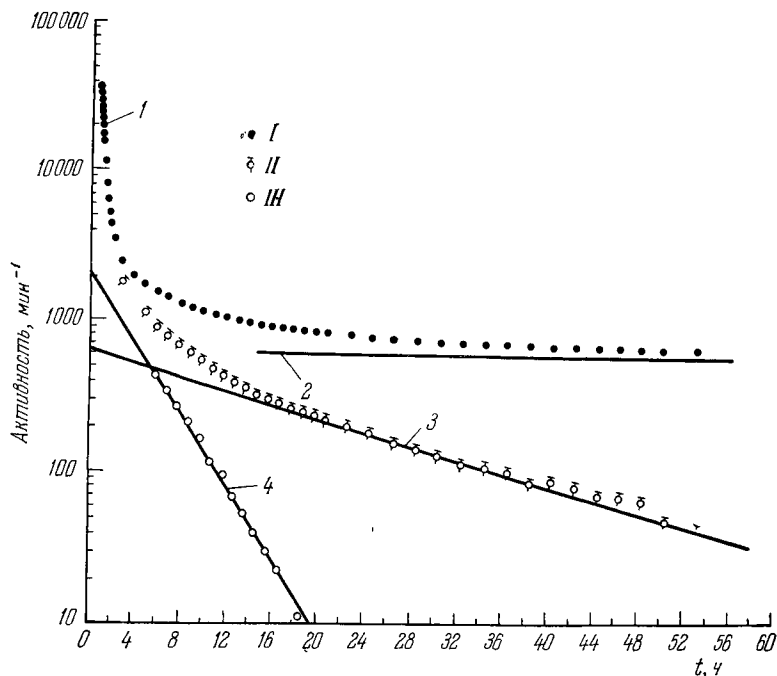


Рис. 13.15. Кривые распада ядер изотопов углекислого рубидия (с примесью калия и цезия), активированных нейтронами из реактора.

*I* — полная активность образца, *II* — результат вычитания из *I* активности долгоживущего изотопа  ${}_{37}\text{Rb}^{87}$  (участок 1), *III* — результат вычитания из *II* активности изотопа  ${}_{16}\text{K}^{42}$  (прямая 2). Прямая 4 соответствует распаду изотопа  ${}_{37}\text{Rb}^{88}$ , 3 —  ${}_{55}\text{Cs}^{134}$ .

${}_{55}\text{Cs}^{134}$  (2,9 ч),  ${}_{19}\text{K}^{42}$  (12,8 ч) и  ${}_{37}\text{Rb}^{85}$  (20 дней). При различии периодов полураспада меньше, чем на 50%, разделение активностей по временам жизни трудно осуществимо. С этой трудностью встречаются, например, при активационном анализе на калий и натрий в биологических объектах, при активации которых нейтронами образуются  $\beta$ -активные изотопы  ${}_{19}\text{K}^{42}$  и  ${}_{11}\text{Na}^{24}$  с периодами полураспада соответственно 12,5 ч и 15 ч. Здесь для разделения пользуются большим различием в максимальных энергиях электронов

распада (3,6 МэВ для  ${}_{19}\text{K}^{42}$  и 1,4 МэВ для  ${}_{11}\text{Na}^{24}$ ). Из формулы (8.37) следует, что  $\beta$ -электроны из калия полностью поглощаются алюминиевым фильтром с толщиной 1,7 г/см<sup>2</sup>, а электроны из натрия — алюминиевым фильтром с толщиной 0,7 г/см<sup>2</sup>. Надо, однако, учесть, что в обоих случаях распад в основном идет на возбужденный уровень, немедленно высвечивающийся с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 1,5 МэВ для распада  ${}_{19}\text{K}^{42}$  и 1,4 МэВ для  ${}_{11}\text{Na}^{24}$ . Эти кванты почти свободно проходят через оба фильтра. Поэтому, если счетчик регистрирует и электроны, и  $\gamma$ -кванты, то разность скоростей счета с фильтром 0,7 г/см<sup>2</sup> и без него дает скорость счета электронов, возникающих при распаде натрия, а разность счета с фильтрами 1,7 и 0,7 г/см<sup>2</sup> дает скорость счета электронов, возникающих при распаде калия. Более точные результаты можно получить, учтя поглощение  $\gamma$ -квантов обоими фильтрами и поглощение электронов низкой энергии, возникающих при распаде калия, тонким фильтром. Если при распадах разных изотопов вылетают  $\gamma$ -кванты, достаточно сильно различающиеся по энергии, то их различают с помощью сцинтилляционных счетчиков (см. гл. IX, § 4, п. 5). Применяются для разделения активности и методы совпадений ( $\beta - \gamma$ ,  $\gamma - \gamma$ ), с помощью которых можно выделять каскадные распады определенного вида.

Для ряда элементов, особенно легких, активация медленными нейтронами либо слишком мала, либо приводит к образованию слишком короткоживущих ядер, что делает невозможным активационный анализ по крайней мере в его традиционной форме. В таких случаях для активации используют быстрые нейтроны, быстрые заряженные частицы (протоны, дейтроны,  $\alpha$ -частицы, ядра  ${}_{2}\text{He}^3$ ), а также  $\gamma$ -кванты с энергией свыше 10—15 МэВ из электронных ускорителей. Нейтронный пучок с энергией 14 МэВ из d—t-разрядной трубки используется, например, для определения концентрации празеодима. Празеодим имеет единственный стабильный изотоп  ${}_{59}\text{Pr}^{141}$ , который обладает замкнутой нейтронной оболочкой ( $N = 82$ ). Сечение захвата нейтрона этим ядром мало, так что оно практически не активируется тепловыми нейтронами. Быстрые же нейтроны вступают с празеодимом в реакцию (n, 2n) с образованием позитронно-активного изотопа  ${}_{59}\text{Pr}^{140}$  ( $T_{1/2} = 3,4$  мин). По активности этого изотопа можно проводить довольно быстрый активационный анализ на празеодим. К легким элементам, слабо активирующимся тепловыми нейтронами, принадлежат кислород, фтор, бор. Для активационного анализа этих элементов используются протонные пучки с энергиями от нескольких до 30 МэВ. Кислород определяется по реакциям  ${}_{8}\text{O}^{18}(p, n){}_{9}\text{F}^{18}$ ,  ${}_{8}\text{O}^{16}(p, \alpha){}_{7}\text{N}^{13}$ , продуктами которых являются позитронные излучатели с удобными периодами соответственно 112 и 10 мин. Этим методом (использовавшимся, в частности, в работах по изучению механизма фотосинтеза) устанавливается содержание кислорода вплоть до  $10^{-6}\%$ . На два порядка более

чувствителен аналогичный метод определения содержания фтора по реакции  ${}^9\text{F}^{19} (p, pn) {}^9\text{F}^{18}$ . Широко используются для активационного анализа реакции  $(d, n)$ ,  $(d, p)$  срыва (см. гл. IV, § 10, п. 4) под действием дейтронов. Эти реакции удобны тем, что они имеют довольно большой выход при низком пороге. Так, для определения содержания бора используется реакция  ${}^5\text{B}^{10} (d, n) {}^6\text{C}^{11}$ , продукт которой является позитронным излучателем с  $T_{1/2} = 20$  мин. Пучок тяжелых заряженных частиц плохо проникает через вещество и поэтому активирует только поверхностный слой. В тех случаях, когда важно активировать толщу вещества, используют быстрые нейтроны или  $\gamma$ -кванты. В редких случаях возможна активация радиоактивными излучателями. Так, с помощью полониевого ( ${}_{84}\text{Po}^{210}$ )  $\alpha$ -источника ( $E_\alpha = 5,3$  МэВ) производится активационный анализ на бор, фтор и некоторые другие (конечно, легкие) элементы. Используются реакции  ${}^5\text{B}^{10} (\alpha, n) {}_7\text{N}^{13}$  и  ${}^9\text{F}^{19} (\alpha, n) {}_{11}\text{Na}^{22}$ , приводящие к образованию удобных для работы позитронных излучателей.

Развиваются экспрессные методы активационного анализа без разрушения, опирающиеся на измерение короткоживущих активностей и даже просто продуктов ядерных реакций. Эти методы используются, в частности, для непрерывного автоматического контроля за ходом различных технологических процессов. Идентификация проводится по  $\beta$ -распадным электронам, по  $\gamma$ -квантам радиационного захвата ( $n, \gamma$ ), по нейтронам и другим частицам, вылетающим в результате ядерных реакций. Используются и  $\gamma$ -кванты, возникающие при возвращении ядра в основное состояние после неупругого столкновения с нейтроном. Для повышения селективности анализа обычно измеряется энергия  $\gamma$ -квантов, а для каскадных процессов часто используется регистрация на совпадения. Примером экспрессного анализа по короткоживущей активности может служить определение содержания кислорода посредством активации быстрыми нейтронами, вызывающими реакцию  ${}^8\text{O}^{16}(n, p) {}_7\text{N}^{16}$ . Период полураспада изотопа  ${}_7\text{N}^{16}$  составляет всего лишь 7,3 с. Регистрируются обычно не  $\beta$ -электроны, а жесткие  $\gamma$ -кванты с энергиями 6,1, 6,9 и 7,1 МэВ, возникающие при переходе продукта распада — изотопа  ${}^8\text{O}^{16}$  — в основное состояние. Примером использования ядерных реакций для элементного анализа может служить использование реакции  ${}^4\text{Be}^9(\gamma, n) {}^4\text{Be}^8$  для анализа на бериллий. Эта реакция имеет на редкость низкий порог 1,66 МэВ (обычно порог реакции  $(\gamma, n)$  лежит в области 10 МэВ). Регистрируются вылетающие нейтроны. Малость порога, во-первых, делает метод исключительно селективным, а во-вторых, дает возможность использовать для активации дешевые и простые в обращении изотопные источники  $\gamma$ -излучения.

Активация излучением используется не только для элементного анализа, но и для получения меченых атомов. Например, при уже упоминавшемся выше изучении износа удобно активировать тру-

шуюся поверхность готового изделия потоком заряженных частиц из ускорителя, вместо того чтобы делать весь подшипник из радиоактивного материала. Так, для исследования износа судовых двигателей в условиях плавания производилась активация рабочих поверхностей цилиндров на циклотроне Московского государственного университета дейтронами с энергией 12 МэВ.

В естественных условиях происходит слабая активация некоторых изотопов вторичными нейтронами от космических лучей. Этот процесс наиболее интенсивен на границе тропосферы и атмосферы. Важнейшей из реакций активации является образование радиоуглерода из азота  ${}^7\text{N}^{14}(\text{n}, \text{p}){}^6\text{C}^{14}$ . Этот углерод окисляется, превращаясь в радиоактивный углекислый газ, который через 10—15 лет полностью перемешивается с основной массой углекислого газа атмосферы. Через углекислый газ радиоуглерод попадает в растения, а оттуда — в живые организмы. Период полураспада радиоуглерода равен 5700 годам. Если считать, что поток космических лучей примерно постоянен во времени, то во всех органических тканях образуется строго постоянная равновесная концентрация изотопа  ${}^6\text{C}^4$ , соответствующая примерно 15 распадам в минуту на один грамм углерода органического происхождения. Но эта равновесная концентрация начинает падать, как только прекращается обмен веществ. На этом основан разработанный В. Либби метод датировки различных археологических предметов органического происхождения. Чем меньше концентрация радиоуглерода, тем больше возраст предмета. Метод Либби позволяет определять возраст предметов, пролежавших в земле от 1000 до 50 000 лет, с точностью до 100 лет. Результаты измерений возраста ряда египетских древностей оказались в хорошем согласии с достаточно надежными летописными данными. Это не только подтвердило надежность методики, но дало возможность сделать заключение о постоянстве потока космических лучей за последние 5000 лет. С помощью радиоуглерода удалось установить много интересных дат. В частности, оказалось, что в Северной и Южной Америке, а также в Англии человек появился 10 400 лет назад, т. е. сразу же после последнего ледникового периода.

6. В заключение этой главы отметим, что здесь перечислены далеко не все пути использования ядерно-физических методов в технике и в других областях науки. Многие из этих применений указывались в других главах книги. Не мешает также подчеркнуть, что основным техническим применением ядерной физики является рассмотренная в гл. XI ядерная энергетика.