

В.И. Кузнецов



Сокровищница  
XXI века



12 коп.





12 коп.

В.И.КУЗНЕЦОВ



Сокровищница  
XXI века



В. И. КУЗНЕЦОВ

---



Сокровищница  
XXI века

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
«ЗНАНИЕ»

Москва  
1972

530.4

**К89 Кузнецов Владислав Иванович**

**К89 Сокровищница XXI века (серия «Прочти, товарищ!»). М., «Знание», 1972, с. 80.**

В книге рассказывается о применении достижений ядерной физики в различных областях народного хозяйства.

2-3-7

530.4

Т. п. 1972 г., № 143

**М**иллиарды лет энергия ядерных реакций, протекающих на Солнце, передается световым потоком на Землю.

Костер первобытного человека, сгорающий ныне в печах уголь, топливо современной ракеты — все это ядерная энергия солнечного вещества, запасенная в разное время растениями и животными в форме химической энергии, энергии электронных оболочек атомов и молекул.

Почти на протяжении всей истории человечества в сфере его потребления были химические источники энергии. Атомное ядро перестало быть «вещью в себе» только в XX веке. Уже первые ядерные исследования привели к открытию источников невиданной до того энергетической емкости: радия, урана, плутония...

В грядущем столетии энергия, полученная в контролируемых ядерных реакциях, станет основой нашего существования.

Но атомное ядро не только кладовая энергии. Издавна людей волновала история возникновения Земли, Солнца, Вселенной. Казалось, что эту грандиозную картину не удастся представить даже в самых общих чертах. Однако изучение свойств атомных ядер, синтез искусственных элементов и изотопов позволили приоткрыть завесу и над тайной происхождения Вселенной. Ядерными методами был точно измерен возраст горных пород и самой Земли, а процессы образования новых атомов в ядерных превращениях служили в какой-то мере моделью синтеза элементов Вселенной. На основании экспериментальных данных, полученных учеными, было создано несколько красивых гипотез о происхождении хи-

мических элементов. Ни одна из них не стала еще надежной теорией, хотя вполне вероятно, что искусственно вызванные ядерные процессы не слишком отличаются от происходивших в природе.

С развитием науки картина творения химических элементов будет непрерывно уточняться. Не исключено, что ее основные фрагменты приобретут ясность и стройность благодаря возрождению и исследованию в земных экспериментах нескольких тысяч новых искусственных ядер, после изучения ядерных процессов в таких космических объектах, как пульсары или сверхновые звезды.

Искусственные атомные ядра и ядерные излучения нужны людям и для целей чисто практических: для разведки полезных ископаемых и изучения биологических процессов, протекающих в организмах растений и животных, для лечения многих болезней и разработки чувствительнейших методов анализа вещества.

К числу фундаментальных и прикладных научных исследований, предусмотренных Директивами XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971—1975 годы, относится «развитие исследований по ядерной физике, физике твердого тела и полупроводников, квантовой электронике, физике плазмы, физике низких температур в целях создания новых материалов и эффективных методов их обработки; дальнейшее совершенствование методов преобразования энергии, промышленное освоение реакторов на быстрых нейтронах, более широкое использование ядерных и радиационных процессов в науке и практике...» («Материалы XXIV съезда КПСС». М., Политиздат, 1971, стр. 244).

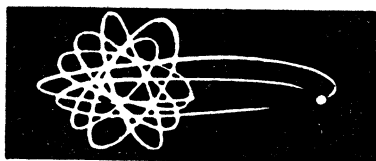
Эти строки из Директив — пример подлинно гуманного решения проблемы взаимодействия науки и общества — проблемы, волнующей ныне всех, кому дороги мир и прогресс, кто озабочен судьбами человечества. Правильное решение этой проблемы не в том, чтобы отказать от научных исследований, таящих в себе опасность для людей, а в том, чтобы достижения науки поставить на службу социальному прогрессу.

По образному выражению академика Н. Н. Семенова, можно исследовать теорию взрыва, чтобы на основе ее данных проложить тоннель в горах, но можно на той же основе взорвать город.

Вполне очевидно, что порождаемые современной на-

укой и техникой возможности для коренного улучшения условий жизни людей и гигантского ускорения социального прогресса могут быть осуществлены при исключении угрозы мировой войны. Отсюда вытекает одна из самых актуальных задач современного общественного развития — борьба за мир и безопасность народов, против использования империалистами колоссальных средств на милитаризацию науки, на гонку вооружений, на извращение самой сути научно-технической революции.

Ныне особенно злободневно звучат слова В. И. Ленина: «Куда ни кинь — на каждом шагу встречаешь задачи, которые человечество вполне в состоянии разрешить *немедленно*. Мешает капитализм». (Полн. собр. соч., т. 24, стр. 17).



## ВОЗРОЖДЕНИЕ ЯДЕРНЫХ БРОНТОЗАВРОВ

Пять миллиардов лет назад завершился великий синтез элементов Солнечной системы.

Вряд ли можно поверить, что когда-либо в лаборатории биолога удастся возродить мамонта или бронтозавра. Возрождение же плутония, «вымершего» за несколько миллиардов лет до появления первого живого организма на Земле, применение изотопов этого искусственного элемента для нужд человека осуществляется ныне в промышленных масштабах. Из 1500 атомных ядер, свойства которых известны физикам, около 1200 получено в лабораториях. По оценкам теоретиков, еще несколько тысяч нуклонных слитков можно считать атомными ядрами. Такие ядра, по-видимому, также возникали во время синтеза элементов Вселенной, но распались за время, отделяющее нашу эпоху от момента образования Земли.

Прежде чем говорить о способах возрождения атом-



ных ядер, напомним, что атомное ядро состоит из ядерных частиц — нуклонов. Нуклонов всего два вида — нейтрон и протон. Эти частицы — основные кирпичи материи. Из них построены ядра всех химических элементов. Электрический заряд нейтрона равен нулю. Нейтрон потому и нейтрон, что он нейтрален. Заряд протона положителен, и его абсолютная величина такая же, как и у отрицательного электрона. В целом атом нейтрален — отрицательный заряд электронной оболочки полностью скомпенсирован положительным зарядом ядра: в атоме ядерных протонов столько же, сколько и электронов. Таким образом, протонное число, как и число электронов в атомной оболочке, однозначно определяет химические свойства элемента и его атомный номер в таблице Менделеева. Атомное ядро характеризуется еще массовым числом — суммой протонов и нейтронов ядра. Так, если в атомных ядрах 92 протона, а число нейтронов принимает разные значения, скажем 140, 142, 143, 146, 148, то все атомы в любых химических процедурах будут вести себя одинаково, несмотря на то что их массовые числа лежат в интервале от 232 ( $92+140$ ) до 240 ( $92+148$ ). Атомные ядра одного и того же элемента, но с разными массовыми числами, или, что то же самое, с разным числом нейтронов в ядре, называют изотопами. Уран, в ядрах которого по 140 нейтронов, называется изотоп уран-232, а если нейтронов 146, то говорят об изотопе уран-238.

Нейтронная составляющая ядер на химические превращения почти не влияет. Зато велико значение нейтронных чисел для устойчивости самих атомных ядер. Все изотопы урана радиоактивны. Уран-238, в атомах которого по 146 нейтронов, распадается с малой скоростью — требуется 4,5 миллиарда лет, чтобы количество урана-238 уменьшилось в два раза. Если же в урановых ядрах 147 нейтронов, то скорость распада увеличится в 100 триллионов раз. Невелика устойчивость и других атомных ядер с нейтронным числом, отличным от 146.

В ядерном реакторе природный уран, а он на 99,27% состоит из изотопа уран-238, захватывает нейтроны. Обогатившись добавочным нейтроном, уран-238 становится изотопом уран-239. Новое ядро испускает бета-частицу — ядерный электрон, и ядро урана становится изотопом искусственного элемента № 93 — нептуния. Происходит микрочудо — рождение нового элемента.

В нейтронных потоках реактора получают все трансураны вплоть до сотого — фермия. Предел ставит тяжелый фермий-258. Лишь после обстрела нейтронами этого изотопа мог бы образоваться элемент № 101 — менделеевий, но скорость распада тяжелого фермия слишком велика.

Представьте себе стрелка, который должен попасть в мишень, неожиданно появляющуюся каждую минуту, но всего на тысячную долю секунды. Есть ли шанс поразить мишень? Конечно. Нужно достаточно долго и непрерывно стрелять в место возможного появления мишени — какая-то пуля и поразит ее. Но если у стрелка мало времени, то вероятность попадания в мишень практически равна нулю.

Атомы фермия, так же как и наша гипотетическая мишень, появляются в зоне нейтронного обстрела на очень короткое время по сравнению со временем, необходимым для прилипания к ним нейтрона. Как правило, они разваливаются на ядра-осколки и только в исключительно редких случаях захватывают нейтроны, но и эти редкие случаи — лишь теоретическая возможность. На деле ни один химик, вооруженный самой современной аппаратурой, не обнаружит менделеевий в веществе, облученном в ядерном реакторе.

Есть другой способ синтеза атомных ядер. Новый ядерный слиток возникает при объединении двух стабильных ядер. В 1937 году итальянский физик Эмилио Сегре открыл первый искусственный элемент технеций. Сегре бомбардировал молибден ускоренными ядрами тяжелого водорода дейтерия. Число протонов в ядре молибдена увеличивалось на единицу, и рождались ядра 43-го элемента, атомы которого в свое время химики тщетно пытались выделить из минералов. Далекое трансураны: нобелий (№ 102), лоуренсий (№ 103), курчатовий (№ 104), а тем более элементы с высшими атомными номерами приходится получать, сливая воедино два сложных атомных ядра. Это не простая задача. Ядра всех элементов заряжены положительным электричеством, и при сближении между ними начинают действовать мощные силы отталкивания. Если бы две булабочные головки можно было зарядить электричеством с такой же плотностью заряда, какая существует в атомном ядре, то на расстоянии 100 километров головки отталкивались бы

друг от друга с силою, равной весу Земли! Чтобы преодолеть эти силы, ядра должны сближаться с громадной скоростью, достигающей десятой доли скорости света. Разогнать сложный атом до такой скорости можно только на специальных гигантских циклотронах или мощных линейных ускорителях.

Быстрые ядра-снаряды падают на неподвижные ядра-мишени и в некоторых случаях образуют одно целое с ними. Из возникшего ядерного слитка и рождается ядро нового атома. Посмотрим на примере, как это происходит.

Обстреляем уран-238 ядрами неона. После слияния снаряда и мишени в новой ядерной капле число протонов равно сумме атомных номеров неона и урана:  $10 + 92 = 102$ . Нагретая внесенной неоном энергией, тяжелая капля «кипит», деформируется, испытывает колебания и, как правило, делится на два сравнительно легких ядра-осколка. Нового элемента не получается. Лишь в одном из ста миллионов случаев из правила бывает исключение: горячая нуклонная капля испускает последовательно несколько нейтронов, нейтронный «ветер» уносит избыточную энергию, охлаждает ядерное вещество, и нуклонный слиток превращается в атомное ядро элемента № 102.

Выходит, что исследователь должен разыскивать среди сотен миллионов радиоактивных ядер-осколков считанные атомы далекого трансурана. А времени ему отпущено мало — проходят считанные минуты, и ядра 102-го распадаются. Поиски еще осложнены и тем, что параллельно основной ядерной реакции протекают побочные — иногда ядро неона передает только часть своих нуклонов ядру урана. В различных реакциях передачи образуются изотопы 101-го и 100-го элемента. Их ядерные излучения нелегко отличить от частиц, испускаемых атомами 102-го элемента.

Не удивительно, что на опознание сто второго ученые Советского Союза, США, Швеции, Англии затратили почти десять лет. Наконец в 1965 году в Дубне, под Москвой, в Объединенном институте ядерных исследований впервые были надежно изучены свойства нескольких изотопов неуловимого элемента.

Еще большие преграды на пути познания свойств элементов с высшими атомными номерами. Вероятность



рождения курчатовия, как говорят физики, «при прочих равных условиях», в сотню раз меньше, чем элемента 102. Когда плутониевую мишень бомбардируют ускоренным неоном, на десять миллиардов слившихся ядер появляется лишь одно элемента 104.

Трудности постепенно преодолеваются, экспериментальная техника идет вперед — невозможное сегодня завтра становится простым и доступным. Уже в 1967 году ученые Дубны начали изучать распад атомов 105-го элемента. Сейчас на мощном дубненском циклотроне с трехметровыми полюсными наконечниками ускоренные пучки неона легко преодолевают электрическое отталкивание ядер самых тяжелых элементов — кюрия, берклия, калифорния. В принципе при бомбардировке таких тяжелых мишеней можно изучать ядра 106-го, 107-го и даже 108-го элементов, клетки которых в таблице Менделеева пока остаются пустыми.

Однако сегодня жерла ядерных машин взяли более дальний прицел. Ученые стремятся проникнуть в еще не изведенную область сверхэлементов.

Что же такое сверхэлемент? Чтобы объяснить это новое слово, придется начать издалека.

Еще на заре ядерной физики, когда молодая наука о ядре делала свои первые робкие шаги, была замечена странная закономерность: радиоактивные ядра, в которых числа протонов или нейтронов равны 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, отличаются повышенной устойчивостью. В те времена физики не могли понять странной закономерности и в шутку называли таинственные числа «магическими». Позднее и атомные ядра с магическими числами протонов и нейтронов стали называть магическими.

Только в 1948 году американский физик Мария Гепперт-Майер опубликовала статью, где излагалась теория, объяснявшая закономерности возникновения магических чисел. По этой теории нуклоны в ядрах образуют оболочки, так же как и атомные электроны. Природа строения нуклонных оболочек совсем иная, но, как и атомы с полностью застроенными электронными оболочками (это благородные газы: неон, гелий, аргон), ядра, у которых все вакантные места в нейтронных и протонных оболочках заняты, особенно прочно удерживают свои нуклоны. Магические ядра наиболее стабильны по отношению к радиоактивному распаду. Современные теории утверж-

дают, что в процессе синтеза элементов Солнечной системы магических ядер должно образовываться больше, нежели близких к ним по массовому числу соседних ядер. И действительно, самое древнее «археологическое» свидетельство — распределение изотопов природных элементов подтверждает теоретические выводы: ядра, в которых содержится магическое число нейтронов или протонов, чаще встречаются в минералах, то есть обладают большей распространенностью.

Теоретические расчеты последних лет показали, что могут появиться новые магические числа, которые еще не найдены ни в природных, ни в синтетических ядрах. Наиболее надежно предсказаны протонное число 114 и нейтронное 184. Сверхтяжелые ядра с таким содержанием нейтронов и протонов могут оказаться гораздо стабильнее других изотопов далеких элементов. Не исключено, что время жизни некоторых сверхядер будет соизмеримо с возрастом Земли. Гипотетические изотопы с предсказанными магическими числами 114 и 184 получили название «сверхэлементов», а область значений атомных номеров и массовых чисел, соответствующую им, называют областью новой относительной стабильности.

Почему новой? Вероятно, потому, что торий и уран, окруженные нестабильными соседями, можно считать расположенными на островке «старой» области устойчивости атомных ядер. Слово «относительной» указывает на то, что сверхэлементы в общем-то тоже нестабильны.

Чтобы получить синтетические ядра сверхэлементов, необходимо сразу перешагнуть через несколько клеток таблицы Менделеева. Если, скажем, бомбардировать искусственный элемент № 94, плутоний, ядрами элемента № 20 — кальция, то в результате слияния этих ядер могут рождаться ядра элемента № 114 ( $94 + 20 = 114$ ). И вот здесь возникают большие осложнения.

Дело в том, что ядра любого элемента особенно упрочняют свою структуру, когда в них содержатся магические числа протонов и нейтронов. Одно из самых прочных природных тяжелых ядер — свинец-208. Его физики называют «дважды магом». В нем представлены сразу два магических числа: протонное 82 и нейтронное 126. Если же свинец-208 поместить в интенсивный поток нейтронов, то из него будут образовываться ядра свинца-209, которые распадаются всего за 3,3 часа. А ведь

ядра свинца-208 настолько стабильны, что еще никому не удавалось и вряд ли в обозримом будущем удастся наблюдать их распад. Но стоило отойти только на один шаг от магического числа 126, как прочнейшее ядро потеряло устойчивость.

Теоретики предсказывают, что такая же картина будет наблюдаться и в новой области относительной стабильности. По расчетам, за числом 126 следует нейтронное магическое число 184. И вот оказывается, если в атомном ядре элемента № 110 будет не 184, а 182 нейтрона, то время жизни уменьшится в 10 миллионов раз. Вывод ясен: создать атомы сверхэлементов, не распадающихся в течение длительного времени, а значит, и доступных для изучения, можно лишь с нейтронным магическим числом. А это очень трудно. Пока физики владеют методами, с помощью которых можно получить ядра элемента № 114 только с «недостатком» нейтронов. В лучшем случае, после слияния богатых нейтронами изотопов плутония и кальция (плутоний-244 + кальций-48) возникает ядерный слиток со 176 нейтронами. До магического числа 184 недостает целых шесть единиц.

В каких же процессах могут рождаться сверхэлементы, насыщенные нейтронами? Может быть, в мощных импульсных потоках нейтронов термоядерного взрыва, где впервые были найдены изотопы 99-го и 100-го элементов, позднее названные эйнштейнием и фермием?

Посмотрим, что происходит при термоядерном взрыве. Горячая кипящая масса центральной области взрыва, где помещен и уран, подвергается нейтронному обстрелу всего миллионную долю секунды. Но интенсивность обстрела так велика, что урановые ядра успевают захватить до 17 нейтронов. Даже в самом мощном ядерном реакторе на увеличение массового числа на 17 единиц потребовалось бы несколько лет! Получаются ядра урана с массовым числом  $238 + 17 = 255$ . Они нестабильны к бета-распаду. Один за другим вылетают из них ядерные электроны, повышается их атомный номер, пока не рождаются устойчивые к бета-распаду ядра фермия, сотого элемента. Затем атомный номер начинает убывать; изотопы фермия радиоактивны, но испускают не отрицательные электроны, а положительные альфа-частицы, и атомный номер дочерних ядер — продуктов распада фермия — равен 98.



Как видим, таким способом достигнуть зоны сверхэлементов невозможно. Чтобы превратиться в 110-й элемент, ядро урана должно захватить не 17, а 50 нейтронов. Столько нейтронов могло бы прилипнуть к урановому ядру в потоке, который поддерживается длительное время и вместе с тем по интенсивности не уступает потоку термоядерной бомбы, когда каждый квадратный сантиметр пространства центральной зоны взрыва пронизывает грамм нейтронов. А если такой поток поддерживается целую секунду? Площадку в 1 см<sup>2</sup> пересекла бы тонна нейтронов! В земных установках такое недостижимо. Кинетическая энергия тонны термоядерных нейтронов равна 120 миллиардам киловатт-часов, годовой энергетической выработке десятка Братских ГЭС. Подобные условия могут встретиться в космических объектах, в нейтронной атмосфере пульсаров, при взрыве сверхновых звезд. Там элементы «варятся» в раскаленной массе, похожей на центральную область только что взорвавшейся водородной бомбы, но еще более плотной и жаркой.

В лабораториях ученые получают искусственные элементы еще одним необычным методом, который, по всей вероятности, в недалеком будущем окажется плодотворным и для создания сверхядер.

Обычно разрушение не приводит к созиданию. Правда, бывают исключения. Одно из них — микровзрыв, деление атомного ядра. Так, при расщеплении урана нейтронами среди ядер-осколков содержатся и несуществующие в природе технеций и прометий. Замечательные открытия сделаны за последние годы. Калифорний-252, изотоп элемента № 98, делится самопроизвольно с большой скоростью и дает мощный поток ядер-осколков. И вот среди осколков калифорния физики нашли странные атомы. Их ядерный заряд равнялся двум, и, очевидно, это были атомы гелия, символ которого стоит во второй клетке таблицы Менделеева. Но если размещать элементы не по ядерному заряду, а по атомным весам, подобно тому, как поступал сам Д. И. Менделеев, то новые атомы оказались бы на месте лития, следующего за гелием элемента № 3. Атомный вес странного вещества был почти таким же, как у лития. Ученые быстро разгадали загадку: при «взрыве» калифорниевых ядер рождались насыщенные нейтронами ядра — гелий-6 и гелий-8.

Нельзя ли получить в процессе деления и богатые нейтронами сверхядра? Ныне теоретики отвечают на этот вопрос утвердительно. Нужно только создать достаточно массивную нуклонную каплю, например слить два тяжелых ядра: ксенон с ураном, уран с плутонием...

Продукт слияния двух тяжелых ядер — нагретое до высокой температуры нуклонное образование — мгновенно делится, и среди осколков могут встретиться ядра сверхэлементов с магическим числом нейтронов.

Пока опыты по слиянию тяжелых атомных ядер еще в зачаточном состоянии. Но многое уже сделано. Так, в Лаборатории ядерных реакций, в Дубне, на циклотронном тандеме уже получен поток ядер ксенона, способных слиться с ядрами тяжелых элементов.

Что же означают слова — циклотронный тандем? Тандем образуют два включенных последовательно циклотрона. Вначале положительные многозарядные ионы ксенона  $\text{Xe}^{+8}$  (положительным ионом называют атом, потерявший один из своих электронов; если же у атома не хватает нескольких электронов, его называют многозарядным. Зарядность иона обозначают цифрой слева сверху у символа элемента; например,  $\text{Xe}^{+10}$  — десятизарядный положительный ион ксенона) ускоряются на циклотроне с трехметровыми магнитными полюсами до сравнительно скромных энергий, а затем, дополнительно, в машине меньших размеров. По ряду причин на второй ступени ускорения, в малом циклотроне, неизбежны большие потери стартовавших частиц. Поэтому по интенсивности тандем проигрывает циклотрону. Зато достигается выигрыш в «калибре» ускоряемых ядер-снарядов. На одиночном циклотроне с трехметровыми полюсами можно получить сравнительно интенсивные пучки ядер, если их атомный номер не более 20. А ведь ксенон занимает 54-ю клетку таблицы Менделеева.

Стоит упомянуть, что циклотронный тандем в Дубне применен впервые. До этого ни в одной из лабораторий мира ничего подобного не делали.

Получить интенсивные пучки ксенона с нужными энергиями можно было бы на гигантском циклотроне, во много раз превосходящем по своим габаритам современные ускорители сложных ядер.

Тогда в руках у физиков оказался бы действенный механизм творения сотен, а быть может, и тысяч новых

искусственных атомных ядер. Их изучение обогатило бы ядерную физику важнейшими опытными данными.

Инженеры и ученые не видят принципиальных трудностей, которые могли бы встретиться при создании такой в общем-то очень сложной машины. Однако на разработку проектов, постройку гигантской фабрики быстрых атомных ядер необходимо затратить немало сил, средств и времени. Рост массы ядер-снарядов — это увеличение размеров циклотрона, предельные напряженности магнитных и электрических полей, высокий вакуум, мощная система охлаждения и многое другое, что требует немалых затрат. Ученым приходится искать новые пути.

На сегодня самым перспективным считается путь, предложенный академиком В. И. Векслером, — «коллективный метод» ускорения.

Известно, что разогнать до высоких скоростей электроны гораздо проще, чем любое атомное ядро. В электрическом поле сила, действующая на «коллектив», то есть на электронное облако такой же массы, как, например, масса атома ксенона, почти в 5000 раз больше силы, с которой поле может воздействовать на ксеноновый атом в самом благоприятном случае, когда он полностью лишен своих электронов. Иначе говоря, атомное ядро по сравнению с электронным облаком весьма медленно разгоняется электрическим полем.

А нельзя ли связать атомное ядро с электронным сгустком так, чтобы сгусток потянул за собой ядро и передал ему свою высокую скорость? Тогда тяжелые ядра будут ускорены до необходимых энергий в относительно слабых электрических полях.

Создать достаточно прочные связи нелегко. Попробуйте привязать телегу к пушечному ядру, которым заряжено орудие. После выстрела лопнет любой трос, а телега останется, конечно, на месте.

И все же был найден способ спайки электронов и ядер в один «коллектив». Тяжелые атомы вводились в сформированное в магнитном поле электронное кольцо высокой плотности. В кольце атомы теряли часть своих электронов и становились положительными ионами и уже не могли покинуть отрицательно заряженное кольцо. Затем электронное кольцо вместе с ядрами ускоряли внешним



электрическим полем до больших скоростей. Тогда такую же скорость набирали и ядра, заключенные в кольцо.

В 1971 году советский физик В. П. Саранцев доложил на VII Международной конференции по ускорителям о получении быстрых ионов азота с помощью электронного тороидального кольца. «Коллективный метод» с одинаковым успехом можно приложить и к ускорению азота и к ускорению урана.

Но вот физики овладели ускоренными пучками самых тяжелых атомных ядер. Что же дальше?

Как правило, с увеличением атомного номера элемента устойчивость его изотопов к различным видам радиоактивного распада снижается: мощные электростатические силы, стремящиеся разрушить ядро, пропорциональны квадрату атомного номера и растут с увеличением протонного числа быстрее, чем силы, объединяющие нуклоны в ядре. И это подтверждает опыт: ядра с высокими атомными номерами самые неустойчивые — за короткое время они распадаются.

Однако если внимательно взглянуть на таблицу Менделеева, то нетрудно обнаружить интересную особенность.

У элемента № 81 — таллия, следующих за ним свинца и висмута есть такие изотопы, что их распад невозможно обнаружить никакими приборами, так медленно он протекает. Но вот за висмутом идут: полоний, астат, радон, франций... Ядра всех изотопов этих элементов распадаются за очень короткое время. А вот ядра тория и урана, хотя их атомные номера больше, значительно стабильнее. Периоды полураспада наиболее долгоживущих изотопов тория и урана соответственно 14 и 4,5 миллиарда лет — величина одного порядка с возрастом нашей планеты. Точно так же изотопы нептуния, плутония, америция, кюрия значительно стабильнее, чем изотопы элементов с меньшими атомными номерами — радия и полония. Таким образом, время жизни уменьшается с ростом атомного номера нерегулярно: спад после висмута, подъем в области торий—уран и новый медленный спад за ураном. У самого устойчивого изотопа плутония период полураспада 70 миллионов лет, у кюрия 15 миллионов лет. Изотопы nobelium — элемента 102 — в лучшем случае распадаются за часы, а атомы курчатовия живут всего лишь минуты.

Будет ли новый подъем времени жизни атомных ядер — такой, как в области урана и тория, для элементов с большими атомными номерами?

Предсказание теоретиками магических чисел 114 и 184 внушает надежду на повышение устойчивости к радиоактивному распаду изотопов с магическим числом нейтронов 184 и атомными номерами 110—126.

Возникает и другой вопрос. Не окажется ли время жизни ядер далекого острова относительной стабильности настолько большим, что они сохранились в природе так же, как радиоактивные уран и торий, но в очень малых концентрациях?

Перед физиками-теоретиками встают очень большие трудности, когда требуется предсказать времена жизни атомных ядер. Задача сложна уже потому, что еще не удалось разгадать до конца природу сил, связывающих протоны и нейтроны в единую каплю ядерного вещества. Поэтому теоретик, рассчитывающий атомное ядро, находится в положении шахматиста, не знающего всех правил игры. А нужно сыграть гроссмейстерскую партию. Ведь расчет взаимодействия многих протонов и нейтронов, — а в ядрах, составляющих гипотетический остров стабильности, их около 300, — сложен сам по себе.

И все же положение не так безнадежно — помогает анализ уже сыгранных партий — анализ свойств изученных ядер. На основе экспериментальных данных, при разумных предположениях физики и оценивают возможное время жизни еще не изученных ядер.

По одной из таких оценок у самых устойчивых изотопов 108-го и 110-го элементов период полураспада может достигать 100 миллионов лет. Хотя эта величина примерно в 50 раз меньше времени, прошедшего с момента завершения творения вещества Солнечной системы, все же небольшая доля магических ядер с атомными номерами 108 и 110 может сохраниться в горных породах, правда, в ничтожных концентрациях.

Сегодня ученые многих исследовательских лабораторий мира, физики и химики, стремятся отыскать сверхэлементы в окружающей нас природе. Что говорить, цель заманчивая. Открытие далеких трансурановых элементов, настолько стабильных, чтобы можно было собрать, скажем, миллиграмм сверхвещества, сыграло бы не меньшую роль в развитии современной нау-

ки, чем химическое выделение радия из урановых руд супругами Кюри.

Не удивительно, что используется любой шанс, все возможные пути поиска природных сверхядер. Один из них — изучение состава быстрых заряженных частиц, приходящих на Землю из космоса.

Не доносит ли до земных пределов поток космических частиц тяжелые ядра таинственного острова стабильности, возникшие в отдаленных галактиках?

Проверить это предположение решил английский ученый Питер Фаулер. Он предложил облучать космическими лучами фотопластинки, покрытые толстослойной эмульсией. В толстой эмульсии тяжелые ядра, летящие со субсветовой скоростью, оставляют следы, по характеру которых можно определять заряд, а следовательно, и атомный номер космического пришельца. Но при одном условии: энергия космической частицы должна оставаться «неприкосновенной». Иначе об изменении заряда не может быть и речи. Космические ядра теряют энергию в плотных слоях атмосферы. Приходится фотопластинки поднимать на большую высоту. Кроме того, было известно, что даже сравнительно легкие ядра железа — редкие космические гости, а уж рассчитывать на регистрацию ядер тяжелее железа можно лишь в случае применения фотопластинок, перехватывающих космические лучи на большой площади.

После длительной подготовки, в 1968 году, наполненный гелием стратостат поднял на высоту около 40 километров громадную сборку с фотопластинками общей площадью 10 квадратных метров. После обработки облученных в стратосфере пластинок сотрудники Фаулера наблюдали в эмульсии сравнительно тонкие треки — следы ядер железа. Гораздо реже попадались «жирные» треки ядер с атомными номерами 80—90. И совсем в редких случаях встречались очень широкие треки. Принадлежат ли эти треки сверхядрам?

В опытах Фаулера зарегистрировано всего три подозрительных трека — слишком мало, чтобы утверждать об открытии космических ядер-гигантов. Но все же это намек на существование стабильных сверхтяжелых атомов космического происхождения. Дело в том, что если бы они распадались с большой скоростью, то не долетели бы до Земли, а превратились бы по дороге в ядра-



осколки с малыми атомными номерами. Пределов Солнечной системы могут достигнуть только ядра с периодом полураспада в несколько миллионов лет — так долг путь космических частиц из далеких галактик.

Если поверить, что Фаулером зарегистрировано три ядра новой области стабильности и что скорость их поступления на нашу планету неизменна, то на всю поверхность земного шара за сутки падает миллиграмм сверхвещества.

Физики задались фантастической задачей, решив разыскать космические ядра в земных породах. Оказалось, что для этого лучше всего спуститься на дно океана. Там, на больших глубинах, царит покой, слабы течения, нет солнечного света. Толщина отложений из верхних слоев океанской воды невелика. Попавшие из космоса на поверхность океана атомы металлов со временем оседают в тонком слое океанского дна. И сама природа может помочь в поисках. Ровное океанское дно усеяно круглыми, напоминающими выкопанный из влажной земли картофель образованиями. Это железно-марганцевые конкреции. Как они образуются, ученые еще не знают, но измерен возраст этих образований. Конкреции на дне океана лежат миллионы лет, и все эти тысячелетия впитывают в себя соединения металлов. Поэтому концентрации марганца, железа, свинца в них значительно выше, чем в остальном веществе океанского дна. Сверхэлементы — металлы, поэтому если их атомы существуют в морской воде, то они концентрируются в океанской «картошке». Можно добыть со дна океана несколько тонн конкреций, размолоть их шаровыми мельницами, растворить и выделить из получившегося раствора фракцию тяжелых элементов. Тогда концентрация сверхядер в извлеченной фракции может оказаться достаточной, чтобы чувствительнейшие счетчики радиоактивных излучений могли почувствовать распад космических ядер. Но может случиться и так, что концентрация все же будет настолько малой, что самая совершенная современная аппаратура не обнаружит распад сверхвещества.

Поиск приходится вести широко. Нельзя исключить, что и в некоторых земных минералах на миллиарды лет затаились сверхядра, родившиеся в эпоху синтеза элементов Вселенной.

Если верить теоретическим расчетам, то самые устойчивые ядра острова стабильности распадаются наполовину примерно за сто миллионов лет. Такие первозданные ядра могли бы сохраниться в веществе земной коры.

Оценим долю радиоактивного изотопа, оставшуюся в килограммовом слитке, возникшем пять миллиардов лет назад из атомов вещества с периодом полураспада 100 миллионов лет.

Древнее предание гласит: великий магараджа предложил изобретателю шахмат выбрать себе награду. Мудрец попросил зерна. Немного. Столько, сколько разместится на 64-й клетке шахматной доски, если на первую клетку положить два зерна, на вторую четыре, на третью восемь... в такой прогрессии до 64-й последней клетки доски. После подсчета оказалось, что на последнее поле придется отгрузить зерна больше, чем его произрастает на всех полях Индии.

Распад ядер подчиняется обратному закону. Природа поместила наш самородок на пятидесятую клетку доски и каждые сто миллионов лет перекладывала его на соседнюю с меньшим номером. Каждый раз число ядер убывало вдвое. Процесс длился пять миллиардов лет, и в самородке сохранилась только одна десятибиллионная доля первичного вещества. Можно ли обнаружить такие концентрации современными методами анализа?

Осколки, на которые распадаются сверхтяжелые ядра, разлетаются с очень большой скоростью. Их энергия в сотни миллионов раз больше энергии, приходящейся на один акт химического превращения. Поэтому современными методами надежно регистрируются единичные акты деления ядер. В останках нашего самородка в среднем за сто суток должно происходить четыре распада. Удастся ли эти редкие события отличить от самопроизвольного деления урана, рассеянного элемента, присутствующего всюду в небольших концентрациях, от деления ядер космическими лучами, да и просто от помех самой измерительной аппаратуры?

Практически установлено, что современные счетчики ядерных частиц обнаруживают новый спонтанно делящийся элемент, если в килограмме породы в среднем за каждые сутки распадается один его атом.

Период полураспада гипотетических сверхэлементов

должен превосходить 110 миллионов лет, чтобы могли существовать минералы, в которых число распадов равно «критическому».

Теоретически, как мы знаем, время жизни самых стабильных ядер новой области исчисляется величиной, близкой к 100 миллионам лет. Если бы это предсказание было точным, то не стоило бы и пытаться искать сверхвещество. Но в сегодняшних расчетах, даже самых тщательных, велика неопределенность.

«Близкой к 100 миллионам» может означать и 40 и 200 миллионов лет. В первом случае в Земле вовсе не останется атомов сверхвещества, а во втором можно было бы обнаружить руды, в каждом килограмме которых происходит несколько миллионов распадов в сутки.

Только опыты ответят на вопрос — сохранились или нет земные сверхэлементы.

Поэтому ученые не ослабляют усилий в поисках далеких трансуранов в горных породах.

Где искать новые элементы, в каких рудах и минералах? Обратимся к периодическому закону Д. И. Менделеева. В шестом периоде между барием и гафнием в одной клетке разместилось сразу 15 химических элементов. Почему? Дело в том, что у всех элементов от лантана (№ 57) до лютеция (№ 71) сходные химические свойства, и эту группу называют лантаноидами, или редкоземельным рядом. Атомы «ряда» отличаются друг от друга лишь строением одной из внутренних электронных оболочек. Внешняя же электронная оболочка у всех лантаноидов одна и та же. Химическое поведение вещества определяется в основном внешними атомными электронами. Поэтому все лантаноиды химические близнецы.

Еще в 1920 году Н. Бор предсказал существование второй группы родственных элементов в области больших атомных номеров. Позднее усилиями ряда ученых было определено и место тяжелого редкоземельного ряда. Первым элементом нового ряда оказался актиний (№ 89). Кроме актиния, тория, протактиния и урана, в ряд актиноидов входят трансурановые элементы. Предсказывать химическое поведение сверхэлементов, а значит, и выбирать минералы и руды, в которых их следует искать, можно было после открытия 104-го элемента, когда определилась граница актиноидного ряда.

Изучение химических свойств курчатовия подтвердило предположение, что его химические свойства совпадают со свойствами гафния. Таким образом, курчатовий уже не принадлежит к актиноидам, и второй ряд химических близнецов заканчивается элементом № 103.

Теперь можно было надежно предсказывать химические свойства очень далеких элементов. Появились таблицы Менделеева, где размещены химические элементы вплоть до № 118, в журнальных статьях обсуждается химическое поведение атомов элемента № 164! Вряд ли такой элемент будет открыт в обозримом будущем, поэтому говорить о нем пока преждевременно. Зато с большой уверенностью можно утверждать, что химические свойства 108-го должны совпадать со свойствами осмия, элемент № 114 должен быть химическим аналогом свинца: экасвинцом назвал бы его Менделеев. Весьма вероятно, что в процессе формирования земной коры и после того, как она уже образовалась, атомы экасвинца в химических превращениях сопутствовали атомам свинца, а атомы экаплатины—элемента № 110—атомам платины. Отсюда можно сделать вывод — искать новые элементы с большими атомными номерами нужно в рудах, содержащих осмий, платину, золото, свинец.

Если существуют изотопы элемента № 114 повышенной стабильности, то, по всей вероятности, распад его ядер будет зарегистрирован в породах, содержащих свинец, или даже просто в самом свинце.

Любопытна попытка обнаружения распада сверхядер в свинцовых стеклах. Осколки любых ядер, делящихся самопроизвольно, скажем, изотопов урана, кюрия, калифорния, оставляют следы-треки во многих материалах. Треки очень малы — всего несколько десятков атомных диаметров тянется осколочный след. Их нельзя обнаружить оптическим микроскопом. Длина световой волны в сотню раз превосходит протяженность осколочного следа, и пытаться различить его, рассматривая в сильный оптический микроскоп, все равно, что пробовать измерять грубой линейкой отверстие размером в десятков микрон.

Следы ядер-осколков удалось наблюдать в поле зрения электронного микроскопа. Слюдяная пластинка помещалась над слоем делящихся ядер урана, а затем на предметный столик электронного микроскопа. На его

экране и появлялись треки. Но так можно поступать, когда изучаются обычные ядра трансуранов. В этом случае несложно приготовить слюдяную или стеклянную пластинку с большим числом треков, так что обязательно какой-то из них попадет в поле зрения электронного микроскопа. Дело обстоит совсем по-другому, когда идет поиск редких событий, например треков сверхядер. Ожидаемая плотность следов сверхядер очень мала. Попытка найти редкие треки может быть успешной только после просмотра большой площади. Малое поле зрения электронного микроскопа привело бы к тому, что на просмотр нужных площадей потребовались бы годы.

Пришлось разработать специальную методику обнаружения следов-треков. Помогла химическая обработка. Слюда или стекло погружали в ванну со специальным раствором. В местах, где внедрялись осколки, вещество растворялось быстрее, чем в остальной части материала, и образовывались достаточно большие — размером в несколько микрон — лунки, похожие на лунные кратеры. «Кратеры» легко просматривались обычным оптическим микроскопом со скромным увеличением, а значит, и с большим полем зрения. Ведь чем увеличение меньше, тем больше поле зрения прибора.

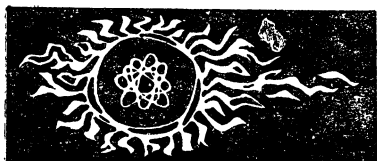
Чтобы найти следы элемента № 114, плавиковой кислотой обрабатывались свинцовые стекла. Стекла древние, пролежавшие в музеях более сотни лет. Все это время гипотетические ядра могли распадаться и оставлять свои меты. За сто лет даже при ничтожных концентрациях спонтанно делящихся атомов накопилось бы достаточно большое число их треков. Но и здесь физиков ждала неудача. Даже в самых старых свинцовых стеклах — технология их варки была разработана в Англии всего 200 лет назад — осколочных треков сверхядер не нашлось.

Поиск нового острова стабильных элементов продолжается. Успех будет означать новый шаг в изучении атомного ядра. Полнее предстанет перед нами еще далеко не завершенная картина строения атомного ядра — для ее дополнения особенно важно синтезировать предельные ядра с максимальным числом протонов и нейтронов. Именно такие ядра, распадаясь, в своей лебединой песне могут полнее рассказать о секретах строения ядерного вещества.



Как изучение вещества в условиях предельных температур и давлений дало многое физике, так и ядра с предельными числами нейтронов и протонов помогут понять природу сил, «склеивающих» в нуклонную каплю протоны и нейтроны элементов Вселенной.

Фундаментальные исследования шире откроют путь практическим применениям ядерной физики. Пока основой ядерной энергетики служит второй трансуранид — синтетический плутоний. Применяются в промышленности, медицине, приборостроении искусственные атомы кюрия, америция, калифорния. Но главное, что дадут нам атомные ядра, сделанные руками человека, — энергия.



## ЭНЕРГИЯ МИРА

Слово «энергия» встречается повсюду — на страницах газет и научных журналов, на щитках электрических машин и приборов, в быту. Чтобы добывать воду, вести поезда, освещать города, необходимо затрачивать энергию. Потребление энергии человеком растет быстрее, чем горная лавина, — за последние 50 лет люди израсходовали ее больше, чем за всю свою предыдущую историю.

К 2000 году, по некоторым расчетам, население Земли должно удвоиться — достигнуть 7 миллиардов человек. И чтобы обеспечить этих новых людей всем необходимым, нужны дополнительные источники энергии.

Альберт Эйнштейн в начале нашего века открыл закон, согласно которому масса вещества  $M$  эквивалентна энергии  $E$  ( $E = Mc^2$ ). В этой знаменитой формуле  $c^2$  — постоянная величина — квадрат скорости света. Если один грамм массы полностью переходит в энергию, то должно выделиться 25 миллионов киловатт-часов. Столько же энергии получается, если в топках сжечь целый эшелон каменного угля.

Однако не так просто освободить скованную веществом энергию, пустить ее в дело.

Во всех химических превращениях, которыми пользуется человек, чтобы добыть энергию, и которые с ее выделением протекают в природных условиях, только очень малая доля вещества преобразуется в энергию.

Допустим, в топке парового котла сгорел килограмм нефти. Сложные молекулы углеводов превратились в углекислый газ и воду и связали 1700 граммов кислорода: нефть + кислород = вода + углекислота + энергия. Вес продуктов сгорания, воды и углекислоты будет меньше веса исходного вещества (нефти и кислорода), потому что часть массы перешла в энергию. Но убыли не отметят даже точнейшие весы,— меньше миллионной доли грамма из 2700 граммов трансформировалось в энергию.

Потому-то на практике изменение массы вещества в химических реакциях никогда не учитывают.

«Зола» одного килограмма урана, сгоревшего в ядерном реакторе, весит 999 граммов. В энергию уже переходит ощутимое количество — миллиардные доли превратились в тысячные. Эффективность ядерного горючего в миллионы раз выше обычного, химического. Почему так происходит, нетрудно понять в свете упомянутого закона Эйнштейна.

Масса вещества, а следовательно, и его энергия, почти полностью заключена в атомных ядрах. На долю остальной части атома — электронной оболочки — приходится менее двухтысячной доли атомной массы. В химических реакциях, когда перестраиваются электронные оболочки, изменения массы на каждый реагирующий атом незначительны (ведь процесс протекает в легкой части атома!) по сравнению с убылью в ядерных превращениях, в которых преобразуется тяжелая атомная сердцевина.

Непрерывно убывает масса нашего Солнца. Ее уносит в пространство Вселенной световой поток, рождаемый ядерными процессами. В недрах Солнца ядра водорода — протоны — становятся ядрами гелия.

Уже в середине двадцатых годов нашего века ученые знали, что из одного килограмма водорода получится только 988 граммов гелия. Дело в том, что масса ядра солнечного элемента меньше массы четырех водородных ядер, из которых можно «сделать» гелиевое ядро. «Мас-

совый» избыток при переходе водорода в гелий и обеспечивает энергией Солнце.

В старых физических журналах можно прочитать удивительные статьи. Они посвящены попыткам превратить водород в гелий. Авторы пытались в обычных лабораторных условиях того времени получить из водорода гелий. Им казалось, что стоит только найти подходящий катализатор, например палладий,— и пойдет желанная реакция. Ставились опыты. В сосуде с водородом находили примесь гелия! Получалось, что реакция протекает уже при комнатных температурах, но слишком медленно... Сегодня, просматривая такую статью, трудно сдержать улыбку — ученые твердо установили: водород становится гелием при температуре порядка 20 миллионов градусов. Очевидно, в тех опытах солнечный газ попадал в сосуд из атмосферы, а не рождался из водорода.

Высокие температуры нужны потому, что водород переходит в гелий по сложной цепи ядерных реакций. В отличие от атомов, ядра реагируют между собой лишь в том случае, когда они движутся с очень большими скоростями, существующими в сильно нагретом веществе. Только тогда они преодолевают силы отталкивания, препятствующие их сближению и взаимодействию между собой.

В нашу эпоху водород — основное вещество, из которого состоит Солнце. Однако на Солнце в незначительных концентрациях есть и другие элементы. Особую роль играет углерод. Атомное ядро обычного углерода захватывает протон и становится родоначальником циклической цепи превращений: после захвата протонов в цепи трижды появляются разные сорта атомов азота, один раз тяжелый изотоп углерода с массой 15 атомных единиц и, наконец, богатый нейтронами изотоп кислорода. Его ядро очень неустойчиво и мгновенно распадается на гелий и обычный углерод, с которого все начиналось. Углерод опять начинает захватывать протоны, и цикл превращений повторяется. В результате количество углерода не изменяется, а в каждом цикле исчезают четыре протона, возродившись в форме гелиевых ядер и дополнительной энергии, уносимой гамма-лучами. К счастью для землян, гелий рождается в центральной области Солнца — только там температура достигает подходящей для его появления величины, и гамма-лучи не достигают

поверхности Солнца. Рассеиваясь на своем пути солнечным веществом, они дробятся на менее энергичные кванты электромагнитного излучения и во внешних слоях светила становятся потоком носителей света — фотонов.

На Солнце гелий образуется и по другим цепочкам ядерных превращений. В одной из них вначале из протонов получаются тяжелые атомы водорода, а потом из них — гелий. И все же главная роль — за углеродной цепочкой, остальные вносят сравнительно малый вклад в энергетику Солнца.

Процесс синтеза гелия приводит к тому, что каждую секунду Солнце теряет 4,3 миллиона тонн своей массы, которая превращается в энергию и уносится в пространство световым потоком. Мизерную часть солнечной энергии — 0,4 миллиардной доли — перехватывает земная поверхность. И вот эти крохи, падающие на Землю с поверхности нашего светила, миллиарды лет поддерживают развитие земной жизни, рождают ветры, разрушают горы.

Ядерная энергия солнечного вещества приходит на Землю слишком рассеянной. Чтобы получить скромную мощность в один киловатт, нужно в солнечный день в средних широтах собрать энергию с поверхности, равной квадратному метру. Да и работать на нас Солнце может нерегулярно, с большими перерывами, — то наступает ночь, то небо затягивают облака. Меняется световой поток и от времени года. А нельзя ли у нас дома, на Земле, построить искусственное Солнце?

Осуществить в земных условиях управляемый синтез гелия из простейших ядер водорода протонов гораздо сложнее, чем из ядер тяжелого водорода дейтерия. Даже на Солнце протоны очень медленно переходят в ядра гелия. На каждую тонну солнечной массы выделяется всего 0,2 ватта. За сто тысяч лет в тонне солнечного вещества один грамм протонов превратится в гелий. Только большой объем нашего светила — естественного термоядерного реактора — спасает положение, и мощность, излучаемая квадратным сантиметром поверхности, достигает 7 киловатт — на каждый квадратный сантиметр работает 35 тысяч тонн солнечной массы.

Пока в современных лабораториях исследователи нагревают тяжелый водород до высоких температур мощными электрическими разрядами. Трудности вели-

ки. Плазму — нагретую до миллионов градусов смесь электронов и атомных ядер — трудно удержать в ограниченной части пространства. Плазма не должна соприкасаться со стенками какого-либо сосуда — нет и не будет материалов, которые выдержат столь высокие температуры, да и холодные стенки отводили бы слишком много тепла от зоны термоядерной реакции и она бы глохла. Поэтому горячую водородную плазму удерживают в определенном объеме с помощью сильных магнитных полей. И хотя в наши дни достигнуты большие успехи в изучении способов получения высокотемпературной плазмы, промышленный энергетический термоядерный реактор, по-видимому, появится еще нескоро.

Но есть другой не менее обильный и уже доступный нам источник ядерной энергии — источник, которым человек уже овладел в полной мере.

Водород и гелий самые легкие элементы. В другом конце таблицы Менделеева, в его девяносто второй клетке, стоит символ урана — элемента, открытого в 1789 году Мартином Клапротом и названного им в честь самой далекой из известных тогда планет. Вот эти граничные элементы и служат источником энергии.

В 1939 году опытным путем было показано, что ядра урана делятся нейтронами. Два изотопа урана — уран-235 и уран-238 — альфа и омега современной ядерной энергетики.

Если в термоядерных реакциях энергия освобождается при образовании из легких протонов более тяжелых ядер гелия, то внутренняя энергия урана, напротив, выделяется после его превращения в сравнительно легкие ядра — в процессе деления. Чтобы разделился уран, высокие температуры не нужны.

Нейтрон — частица нейтральная, и положительно заряженное ядро не отталкивает летящий в его направлении нейтрон. Изотоп уран-235 делится нейтронами очень малой энергии. Чем меньше скорость или, что равнозначно, температура нейтронов, тем с большей вероятностью они прилипают к ядру. Когда медленный нейтрон проходит на небольшом расстоянии от ядра урана, мощные силы притяжения втягивают его в ядро. Нейтрон вносит в урановое ядро энергию и нагревает его. Меняется форма, вместо шара ядро становится похожим на гимнастическую гантель, колеблется и делит-



ся затем на две части — ядра-осколки. Ядра-осколки испускают новые нейтроны, иногда два, иногда три, а в среднем на одно деление приходится две с половиной частицы.

Цепной процесс развивается по тем же законам, что и горная лавина. Если в композицию урана и замедлителя нейтронов попадает «случайный» космический нейтрон, то после его столкновения с ядром урана возникает два или три нейтрона. Новые нейтроны порождают, как минимум, четыре, четыре — по меньшей мере восемь... Наконец, когда нужный уровень мощности достигнут, развитие цепной реакции задерживают, иначе в зоне, где протекает реакция, выделится слишком много тепла и ядерный реактор будет разрушен. Как правило, мощность реактора поддерживают неизменной — как, скажем, мощность паровой турбины электростанции. Мощность цепной реакции остается постоянной, если процесс ведут так, чтобы нейтроны, рожденные при делении одного ядра, расщепляли бы также только одно ядро. Этого добиваются, исключая часть нейтронов из участия в цепной реакции. В зону реакции вводят регулирующие стержни, которые и поглощают лишние нейтроны.

Теоретически возможность осуществления цепной ядерной реакции на тяжелых атомных ядрах впервые была показана советскими физиками Я. Б. Зельдовичем и Ю. Б. Харитоном. На опыте первыми в этом убедились французские ученые. Работами руководил Фредерик Жолио-Кюри. Французским физикам, однако, осуществить незатухающую реакцию не удалось: едва из зоны реакции извлекался посторонний нейтронный источник, реакция глохла. Самоподдерживающаяся цепная реакция пошла в 1942 году на установке знаменитого итальянского физика Энрико Ферми, построенной в США. Мощная американская промышленность, удаленность от фронтов мировой войны способствовали пуску в США первых атомных реакторов, созданных на основе исследований Ферми. Американские реакторы предназначались для накопления ядерной взрывчатки — плутония, которым были начинены первые атомные бомбы, варварски сброшенные на японские города в 1945 году.

Советские ученые раньше других начали работать по применению ядерной энергии в народном хозяйстве.

С пуском первой атомной электростанции в Советском Союзе в июне 1954 года был сделан первый важнейший шаг к использованию энергии атомного ядра в мирных целях, к огромным запасам ядерного топлива, скрытого в горных породах.

В земной коре в среднем на тонну породы приходится четыре грамма урана. Количество громадное. Если бы удалось извлечь весь уран, скажем, до глубины два километра, то получилась бы фантастическая цифра — 16 триллионов тонн! Энергии, заключенной в таком количестве урана, человечеству хватило бы на сотни тысячелетий. Однако в наши дни только небольшая доля урана может быть с выгодой пущена в дело. Пока убыточно добывать руду с малым содержанием урана, на его извлечение пришлось бы затратить больше энергии, чем ее получают в современных энергетических ядерных установках. Ныне на Земле во всех пригодных для экономически выгодной разработки месторождениях урановой руды, по данным зарубежной печати, содержится только восемь миллионов тонн металла. Энергетическая емкость восьми миллионов тонн тяжелых ядер всего в пять раз больше запасов, содержащихся в разведанных источниках обычного топлива. И то при условии, что будет использована полностью энергия тяжелых ядер урана.

Освободить энергию основной массы урана — задача не из простых. Дело в том, что цепную ядерную реакцию поддерживает только легкий изотоп уран-235, а уран-238 — своеобразный балласт ядерного топлива — поглощает часть нейтронов, возникающих при делении легкого изотопа. Вместе с тем основная масса природного урана — уран-238. На долю урана-235 приходится только одна стосороковая часть.

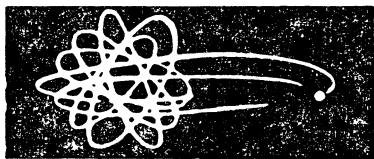
К счастью, есть путь преобразования балластного урана-238 в отличное ядерное топливо, искусственный трансурановый элемент плутоний. Для этого лучше всего подходят специальные реакторы-размножители.

Кроме урана, энергию может дать и другой тяжелый элемент — торий. Из тория — он занимает девяностую клетку в таблице Менделеева — в ядерном реакторе образуется искусственный изотоп уран-233, который ни в чем не уступает урану-235: делится тепловыми нейтронами и хорошо поддерживает цепную реакцию.

Еще в начале нашего века многие ученые предсказывали, что в недалеком будущем запасы нефти, газа, угля будут израсходованы и наш мир начнет ощущать энергетический голод. В наши дни мрачные опасения оставлены: проникновение в тайны атомного ядра навсегда избавило человека от страха перед грядущим истощением топливных ресурсов. Энергетические установки, в которых сгорает уран-235, многие года дают ток в электрические сети Советского Союза, и число их будет расти.

Уже в девятой пятилетке в нашей стране начнется осуществление широкой программы строительства атомных электростанций, прежде всего в Европейской части, где ресурсы природного топлива ограничены. Эта программа рассчитана на 10—12 лет. После ввода в строй намеченных к строительству атомных электростанций наше народное хозяйство получит дополнительно 30 миллионов киловатт («Материалы XXIV съезда КПСС», М., Политиздат, 1971, стр. 147).

Пока для промышленных и иных целей будет идти энергетический поток освоенных источников, на Земле создадут искусственное Солнце — термоядерный реактор, а может быть, освоят и другой, еще более эффективный источник. Запасов энергии, скрытых в ядрах дейтерия, трития, хватит человечеству поистине на вечные времена.



## АТОМНЫЙ КОТЕЛ

Так в начале атомного века называли ядерный реактор на тепловых нейтронах. И поныне это самый распространенный, самый освоенный тип реактора. Тепловые реакторы — сердце современных атомных электростанций.

В таком реакторе уран-235 захватывает нейтроны с энергией, близкой к энергии тепловых колебаний атомов

замедлителя — вещества (обыкновенно графита или воды), окружающего уран, загруженный в реактор. При делении атомов урана рождаются быстрые нейтроны. Их энергия в сотни миллионов раз превосходит тепловую. В столкновениях с атомами замедлителя быстрые нейтроны постепенно теряют скорость и через некоторое время становятся тепловыми. Замедленные нейтроны с гораздо большей вероятностью, чем быстрые, прилипают к урану-235. В то же время с балластным ураном-238 степень взаимодействия остается незначительной. Это способствует протеканию цепной ядерной реакции в природном уране. Нейтроны малых энергий как бы выискивают среди пассивных атомов урана-238 ядерное горючее — уран-235.

Реактор высокой мощности на тепловых нейтронах — внушительное сооружение. Площадь здания, в котором он размещается, 20 тысяч квадратных метров, высота 34 метра. В активной зоне реактора 1337 каналов, в каждом — урановые стержни длиной около четырех метров. Пространство между стержнями заполнено замедлителем — графитом. Всего в реакторе 1400 тонн графита, около 100 тонн естественного урана. Мощность такого реактора порядка миллиона киловатт.

На каждый ватт мощности цепной реакции происходит 30 миллиардов делений ядер в секунду. Такое колоссальное число соответствует лишь одной тысячной микрограмма разделившегося урана. Активная зона реактора на тепловых нейтронах напоминает стены древних каменных зданий, только вместо белого камня в реакторной кладке — черные графитовые блоки. Форма кладки близка к кубу с ребром в несколько метров. Куб пронизывают отверстия, в них заложен уран в металлических оболочках, надежно предохраняющих его от взаимодействия с водой и воздухом. Нейтроны, родившиеся в уране, попадают в графит и отдают энергию легким ядрам углерода. Потеряв энергию, нейтроны вызывают новые деления урана-235 и поддерживают цепную реакцию. Деление ядер на осколки сопровождается интенсивным гамма-излучением. К реактору, работающему на мощности около десятой доли ватт, уже нельзя приближаться, если он не окружен слоем вещества, поглощающего гамма-лучи и нейтроны. Поэтому у мощного реактора многометровая бетонная защита. Неплохо погло-

щает нейтроны и обыкновенная вода. Так, в реакторах бассейнового типа активная зона погружена в воду на глубину в несколько метров. Когда мощность не слишком велика, слой воды такой толщины надежно защищает и от гамма-лучей и от нейтронов. Если подойти к краю бассейна работающего реактора, то в глаза бросается яркое сине-голубое свечение, исходящее от урановых стержней. Это излучение Черенкова. Расщепление ядер нейтронами сопровождается появлением энергичных гамма-квантов. Такие гамма-кванты вырывают электроны из оболочек молекул воды и придают им громадную скорость, чем и вызывается световое излучение.

Но в самой активной зоне реактора, где происходит деление ядер урана-235, видимого излучения нет. Осколки деления урана — атомные ядра с порядковыми номерами от нескольких единиц до 80.

Активная зона реактора — мир ядерных превращений. Часть нейтронов цепной реакции захватывают ядра урана-238. Нейтрон не изменяет атомного номера урана — получается изотоп уран-239. Новый изотоп нестабилен, испускает ядерный электрон — бета-частицу — и становится ядром первого трансуранового элемента № 93 — нептуния. Нептуний, в свою очередь, переходит таким же путем в плутоний-239, который распадается наполовину за 24 тысячи лет, — время достаточно большое, чтобы не беспокоиться о потерях. В отличие от урана-238 плутоний-239 делится тепловыми нейтронами и может служить отличным ядерным горючим. По своим «реакторным» характеристикам он даже превосходит уран-235.

Плутоний — родоначальник новых искусственных элементов, накапливаемых в ядерном реакторе. В обычном реакторе плутоний облучают месяцами, а то и долгие годы, чтобы получить высшие элементы. Но, оказывается, можно построить реакторы, в которых интенсивность нейтронов особенно велика и новые элементы накапливаются быстрее.

В нейтронных потоках ядерных реакторов производят почти все радиоактивные изотопы, применяемые в науке, технике, медицине.

Но главное, что дают тепловые реакторы, — энергия и новое ядерное горючее — плутоний.



Проследим путь, по которому энергия тяжелого атомного ядра, расщепившегося в активной зоне реактора, попадает к электрическим двигателям заводов, лампам, освещающим города и села, в радиаторы отопления наших жилищ.

В процессе деления ядра основная доля освобожденной энергии переходит в кинетическую энергию осколков. Ядра-осколки летят со скоростью, примерно равной десятой доли скорости света. Осколки тормозятся в уране и веществе, окружающем уран. При торможении их энергия переходит в тепло. Тепло отводится водой, протекающей через активную зону. Горячая вода поступает в специальный теплообменник — парогенератор.

В активную зону первой в мире советской АЭС вода входит под давлением, нагретая до  $130^{\circ}\text{C}$ . На выходе из активной зоны температура повышается до  $270^{\circ}\text{C}$ . И все же вода не закипает и не становится паром. Она проходит по трубам парогенератора под давлением сто атмосфер. Высокое давление удерживает воду в жидком состоянии. Тепло от контура высокого давления передается через стенки труб воде под низким давлением, и она превращается в пар с давлением 12 атмосфер и температурой  $260^{\circ}\text{C}$ . Пар поступает в сопло турбины и движет ее колесо, вращающее вал генератора.

Из законов термодинамики следует — с увеличением температуры и давления растет коэффициент полезного действия. В современных АЭС и давление и температура пара значительно выше, чем у первенца ядерной энергетики.

Мощность первой АЭС, отдаваемая в электрическую сеть, всего 5000 киловатт.

Мощность больших современных атомных станций — таких, как Нововоронежская или Белоярская, в десятки раз превосходит мощность первой АЭС. Выше и температура и давление пара, приводящего в действие турбину. Коэффициент полезного действия современных атомных электростанций немногим меньше, чем у обычных, сжигающих химическое топливо (соответственно 32 и 39%), хотя узлы тепловых станций обрабатывались столетиями.





## ЯДЕРНЫЙ КОМПЛЕКС

Оказывается, можно построить реактор-размножитель, в котором из урана-238 или тория-232 накапливается больше ядерного горючего, чем сгорает.

Однажды Илья Муромец был побежден волшебными воинами. Рассечет богатырь мечом воина, а вместо одного появляются двое. В ядерном реакторе-размножителе все происходит, как и с волшебным войском: чем больше такой реактор вырабатывает тепла, тем больше в нем накапливается ядерного горючего.

Пока построены первые опытные реакторы-размножители. К середине 80-х годов, по оценкам ученых удастся создать совершенные реакторы такого типа. Тогда особенно возрастет роль ядерной энергии в нашей жизни. Огромный поток энергии промышленных реакторов-размножителей будет использоваться по-новому.

Представим себе громадный индустриальный комплекс будущего, совсем не такого уж и далекого. Энергию гигантский ядерный комплекс получает от реактора-размножителя в несколько миллионов киловатт. Вокруг энергетического центра расположены заводы и фабрики. Не видно привычных самосвалов, перевозящих сырье, топливо, руду. Доставка сырья и обслуживание комплекса предприятий другими материальными средствами осуществляются по подземным конвейерам и трубопроводам. Широкие транспортные тоннели соединяют городские кварталы со всеми производственными и общественными зданиями. Проблема загрязнения окружающей среды отходами производства решается использованием мощных очистительных сооружений. Энергии хватает на все. Добываются большие количества дешевого водорода. В его среде восстанавливается железная руда, выплавляется металл невиданной в наше время чистоты. Фосфор для химической промышленности и

удобрений, карбид кальция, необходимый во многих производственных процессах, сталь, потребляемая машиностроением,— все это будет производиться в электрических печах. Сегодня только высокая стоимость электрической энергии ограничивает масштабы применения электростали самыми ответственными областями машиностроения, где нужен особо прочный, надежный металл.

Дешевая электрическая энергия — основа производства алюминия. Поэтому алюминий будет применяться еще шире, чем в наше время. Он пойдет на отделку зданий, изготовление мебели.

Изобилие энергии — это дешевые реактивы, необходимые мощным химическим заводам, электролитическая медь, синтетические материалы разнообразных видов.

Создавать комплексы предприятий будущего смогут только люди с глубокими знаниями, широким образованием — квалифицированные люди. В нашей стране принимаются все меры для роста квалификации кадров социалистической промышленности. В девятой пятилетке будет завершено введение всеобщего среднего образования. «Решение этой задачи,— подчеркивал тов. А. Н. Косыгин на XXIV съезде КПСС,— имеет огромное политическое и социальное значение. Осуществление всеобщего среднего образования предоставит каждому широкие возможности избирать профессию по призванию, наилучшим образом применять свои способности на благо всего общества». («Материалы XXIV съезда КПСС». М., Политиздат, 1971, стр. 180).

Наряду с осуществлением всеобщего среднего образования в новой пятилетке будет уделено большое внимание профессионально-техническому образованию, подготовке специалистов, в том числе для новых отраслей науки и техники. Поставлена задача подготовить за пятилетие не менее 9 миллионов квалифицированных рабочих и примерно 9 миллионов специалистов с высшим и средним образованием для всех отраслей народного хозяйства.

Основная работа по сооружению грандиозных ядерных комплексов ляжет на плечи сегодняшним школьникам. Тысячи молодых инженеров, ученых, рабочих будут заняты проектированием и пуском предприятий, построенных на основе новейших достижений науки.

Экономические исследования, проведенные за последние годы, выявили особенную перспективность размещения ядерных центров на землях, страдающих от недостатка пресной воды. На нашей планете обширные пространства вдоль морских побережий лишены полностью или почти полностью пресной воды. Протяженность таких пустынь 30 000 километров — это три четверти земного экватора.

Мало людей представляют себе, какие огромные количества воды необходимы для производства. На выращивание зерна, которого хватает на ломоть хлеба, требуется 150 литров воды; чтобы домашнее животное прибавило в весе на один килограмм, требуется 35 000 литров!

В Советском Союзе особенно засушливы земли, лежащие на территории между Каспийским и Аральским морями.

Мощный реактор для опреснения воды и строится в этом районе на берегу Каспийского моря, неподалеку от города Шевченко, — прообраз энергетической основы будущих комплексных промышленных и сельскохозяйственных центров, питающихся водой, опресненной энергией тяжелых атомных ядер. В таких центрах на пустынных морских побережьях вырастут фабрики продовольствия — сельскохозяйственные предприятия, основанные на последних достижениях науки. Реактор-размножитель в один миллион киловатт за сутки опреснит полтора миллиона кубических метров воды. Вещества, извлеченные из морской воды, пойдут на производство ценнейших фосфорных и аммиачных удобрений. Часть ядерной энергии преобразуется в электричество. Реакторная электростанция даст возможность полностью электрифицировать переработку пищевого сырья.

На сотнях тысяч гектаров земли, орошаемой опресненной водой, люди будут собирать богатые урожаи. На необычной земле будут произрастать необычные растения — их выведут специально для посева на орошаемых землях. Облучая радиоактивными излучениями семена, селекционеры смогут воздействовать на наследственность и затем отбирать наиболее подходящие виды: урожайные, устойчивые к заболеваниям. Регулярное внесение в почву удобрений, получаемых с местных заводов, слабая зависимость от атмосферных условий, —

все это позволит собирать ежегодно устойчивые урожаи зерновых культур, овощей, фруктов. Исчезнут неурожайные годы. Ядерный индустриально-сельскохозяйственный комплекс сможет производить в год 500 тысяч тонн высококачественного зерна — количество, достаточное для питания нескольких миллионов человек. Некогда пустынные берега покроются цветущими садами, фабриками и заводами. И основой такого промышленного района будет ядерная энергетическая установка с мощным реактором-размножителем.

Реактор-размножитель промышленного типа, обеспечивающий производство энергии по выгодным ценам,— основная цель, к которой стремятся ученые-энергетики. Разработано несколько типов ядерных реакторов, в которых накапливается ядерного горючего больше, чем выгорает. Самым перспективным типом считается реактор на быстрых нейтронах, загруженный плутонием. Такой реактор называют иногда «быстрым», подчеркивая, что цепная реакция в нем протекает на быстрых нейтронах. В процессе деления тяжелых ядер урана, плутония рождается иногда два, а иногда три нейтрона на каждый акт распада ядра. Появившиеся нейтроны обладают большой скоростью — 10 000 километров в секунду. Как мы знаем, в тепловом реакторе они теряют скорость, сталкиваясь с легкими ядрами замедлителя. В активной зоне быстрого реактора легких ядер почти нет, а тяжелые ядра слабо замедляют нейтроны. Быстрый нейтрон не успевает потерять энергию до своего столкновения с ядром плутония. Опыты показали, что в процессе взаимодействия быстрых нейтронов с плутонием чаще рождается три нейтрона. На десять случаев деления в семи появляется три, а в трех два нейтрона — всего 27. Следовательно, в среднем на захваченный плутонием нейтрон рождается 2,7 новых. Эта цифра играет громадную роль. Если бы после каждого деления освобождалось только два нейтрона, то и тогда, правда теоретически, можно добиться воспроизводства ядерного горючего. Действительно, один из нейтронов направим на поддержание ядерной реакции, а другой на образование плутония из урана-238. Тогда, распадаясь в цепной ядерной реакции, килограмм урана-235 даст столько же равноценного ядерного горючего—плутония. В действительности дело обстоит иначе. В ре-

альном реакторе часть нейтронов покидает объем активной зоны, часть поглощается конструкционными материалами, ядрами изотопов, образующихся в процессе деления. Современный опыт подтверждает очевидную истину — без потерь нейтронов не обойтись. Чтобы количество накопившегося горючего равнялось количеству выгоревшего, в реальных атомных котлах в среднем на каждый акт деления должно рождаться 2,2 нейтрона. Но на каждый захваченный ядром плутония быстрый нейтрон возникает в среднем 2,7 нейтрона:  $2,7 - 2,2 = 0,5$ . Таким образом, на два разделившихся ядра появляется лишний нейтрон, и его можно пустить на расширенное воспроизводство ядерного горючего.

Подсчитаем подробнее. Итак, на десять захваченных плутонием нейтронов высокой энергии в среднем появляется 27 нейтронов. Десять из них приходится возвращать цепной реакции, два теряются бесполезно, а пятнадцать идут на синтез плутония. Из десяти ядер плутония получается энергия, и число ядер в полтора раза больше исходного. Иными словами, на каждый килограмм выгоревшего в быстром реакторе плутония освобождается 22,5 миллиона киловатт-часов энергии и получается 1,5 килограмма плутония. Из 1,5 килограмма нового плутония после его химического выделения и загрузки в реактор-размножитель, в свою очередь, генерируется уже 34 миллиона киловатт-часов и накапливается 2,25 килограмма плутония.

Конструкция быстрого реактора очень сложна. Его активную зону нельзя охлаждать водой, да и количество других теплоносителей в ней приходится ограничивать до минимума. В зоне ядерной реакции нельзя помещать много и конструкционных материалов. Иначе нейтроны, рассеиваясь на сравнительно легких ядрах охлаждающего вещества и элементов конструкций, теряют слишком много энергии и не обеспечат нужной высокой «рождаемости» нейтронов. С другой стороны, плутониевые стержни должны быть стойкими и к значительным тепловым нагрузкам и к длительной бомбардировке нейтронами и гамма-лучами.

Основная составляющая компактной активной зоны быстрого реактора — плутоний. Зона невелика по размерам и окружена массивным кольцом из урана-238, в котором цепная реакция не протекает. Из активной



зоны в урановое кольцо «вытекают» нейтроны. Их захватывает уран, и его ядра переходят в плутоний. Так возрождается расщепившееся ядерное горючее. Кольцевая урановая зона и называется зоной воспроизводства. Обе зоны — активная и воспроизводства — охлаждаются жидким натрием.

Из активной зоны нагретый до высокой температуры натрий поступает в теплообменник и нагревает воду до  $400^{\circ}\text{C}$ . Вода в парогенераторе превращается в пар с давлением 40 атмосфер. Пар высокого давления отдает свою энергию турбине — приводу электрического генератора. Тепло отработанного пара идет на опреснение воды.

Расплавленный металл охлаждает! Звучит немного странно. Но стоит вспомнить о громадной мощности реакторов и сравнительно низкой температуре плавления натрия ( $+98^{\circ}\text{C}$ ), как все становится на свои места. Иногда зону охлаждают гелием под давлением нескольких сот атмосфер. Другие теплоносители для охлаждения зон быстрых реакторов не подходят. Вещества, в состав которых входит водород (вода, органические соединения), быстро замедляют нейтроны, а ведь именно такие вещества снимают тепло в подавляющем числе современных машин. Любое вещество замедляет нейтроны, но чем оно тяжелее, тем больше столкновений требуется, чтобы нейтрон стал медленным. Если бросить на тяжелую металлическую плиту биллиардный шар, то он отразится почти с такой же скоростью, с какой падал на плиту. Пусть теперь летящий шар столкнется лоб в лоб с таким же по массе свободно подвешенным на нити покоящимся шаром — шары обменяются энергией. Шар-снаряд остановится, а шар-мишень приобретет всю энергию.

Для нейтронов тяжелые ядра играют роль стальной плиты: быстрый нейтрон замедлится до тепловых энергий только после 2000 столкновений с ядрами урана-238. Нейтрон, взаимодействуя с ядром водорода, которое весит почти столько же, в некоторых случаях за одно столкновение передает всю энергию протону.

Почему же еще не созданы промышленные быстрые реакторы?

Прежде всего потому, что сегодня высока стоимость их строительства и эксплуатации.

В таком реакторе цепная реакция идет, только если в нем заложено более сотни килограммов ценнейшего плутония—металла в десятки раз дороже золота. Недешево обходится и обслуживание современного быстрого реактора. Часто приходится заменять плутониевые стержни активной зоны, потому что после превращения незначительной части плутония в ядра-осколки вещество стержня меняет структуру, стержень теряет прочность и становится непригодным для дальнейшей эксплуатации. Его извлекают и направляют на химический завод — первое звено регенерации. Поэтому каждый грамм ядерного топлива, прежде чем сгореть в реакторе, несколько раз циркулирует по сложной технологической цепи: на химическом заводе, в металлургической лаборатории, в цехе, где плутоний заключают в герметичную защитную оболочку. Многократные переработки повышают стоимость энергии, а ведь в конечном итоге стоимость ядерной энергии должна стать ниже обычной. Тогда она вытеснит другие источники, по-настоящему внедрится в нашу жизнь. Значит, нужно уменьшить число циклов, повысить работоспособность активной зоны, разработать рациональную технологию химической переработки облученных в реакторе стержней, упростить их конструкцию.

«...Необходимо решить важные научные задачи, связанные с развитием реакторов на быстрых нейтронах, осуществляющих воспроизводство атомного топлива. Сооружение опытных реакторов-размножителей промышленного масштаба уже начато. Но их широкое внедрение ставит большие задачи перед наукой»,— говорил президент АН СССР академик М. В. Келдыш.

Одна из основных задач, стоящая перед инженерами и учеными, которые работают над созданием и внедрением быстрых реакторов,— выбор рациональной схемы охлаждения активной зоны. Пока считается самой перспективной система охлаждения, когда активная зона, теплообменники и натриевые насосы погружены в общий большой бак, наполненный расплавленным металлом.

Другая задача — разработка плутониевых стержней, способных длительное время выдерживать мощные потоки нейтронов, тепла и гамма-лучей, не меняя своих геометрических размеров и прочностных характеристик.

Лишь после решения этих проблем начнется промышленное освоение реакторов с расширенным воспроизводством горючего.

Однако не только на быстрых реакторах возможно расширенное воспроизводство. Мы уже упоминали, что после облучения нейтронами природный торий становится искусственным изотопом уран-233. В цепной реакции на тепловых нейтронах уран-233 дает больше дополнительных нейтронов, чем уран-235 или плутоний, но меньше, чем плутоний в быстром реакторе. В специально сконструированном тепловом атомном котле, загруженном ураном-233 и торием, на каждый килограмм распавшегося в нейтронном потоке урана-233 можно получить 1,1 килограмма этого же изотопа. В наше время такие реакторы отодвинуты на второй план в основном потому, что в плутониевом цикле: плутоний  $\rightarrow$  осколки деления + нейтроны  $\rightarrow$  нейтроны + уран-238  $\rightarrow$  плутоний, коэффициент воспроизводства больше, чем в уран-ториевом цикле: уран-233  $\rightarrow$  осколки + нейтроны  $\rightarrow$  торий + нейтроны  $\rightarrow$  уран-233.

В первом цикле на грамм выгоревшего образуется 1,7 грамма нового плутония, а в уран-ториевом цикле на 1 грамм урана-233 возникает только 1,1 грамма ядерного горючего. Высокий коэффициент воспроизводства играет большую роль, но в конечном итоге важны экономические факторы — стоимость производимой энергии и возможность быстрого наращивания энергетических мощностей.

Кроме коэффициента воспроизводства, приходится учитывать и оборачиваемость ядерного горючего. Так, скажем, если уран-233 в тепловом реакторе будет сгорать в 10 раз быстрее, чем плутоний в реакторе на быстрых нейтронах, то за один и тот же период уран-ториевый реактор даст прибавку горючего, равную его первоначальной загрузке (100%), а уран-плутониевый только 70%.

Почему такое предпочтение уран-ториевому циклу? Есть для этого веские основания. Уран-ториевый цикл протекает в тепловом реакторе, где горючее распределено вместе с замедлителем в большом объеме. В тепловую активную зону сравнительно просто ввести много охладителя и с каждого грамма урана-233 снять огромное количество тепла — гораздо большее, чем с грамма

плутония, заложенного в компактную и трудную для охлаждения зону быстрого реактора.

Поэтому сейчас некоторые ученые считают, что списывать со счета уран-ториевый цикл еще рано. Быть может, развитие ядерной энергетики заставит нас изменить взгляды на соотношение сил в конкурентной борьбе «быстрых» и «медленных» реакторов.

Этап тепловых реакторов — естественная и неизбежная ступень в ядерной энергетике. Первоначальные запасы плутония, необходимые для пуска быстрых реакторов-размножителей, можно было накопить лишь в тепловых реакторах на естественном уране. Тепловой этап уже пройден. Плутония получено достаточно для загрузки многих реакторов-размножителей. Так, по опубликованным данным, в США ежегодно производится около 10 тонн плутония в год.

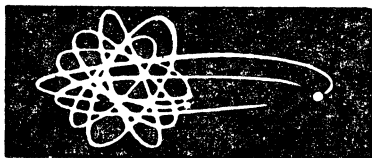
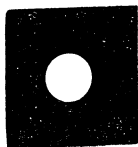
Волнует еще очень важная проблема — безопасность мощных ядерных установок. Системы автоматического регулирования должны быть такими, чтобы полностью исключалась возможность самопроизвольного разгона реактора в любых условиях. Должны быть предусмотрены даже землетрясения! Ведь если после сильного сейсмического толчка разрушится корпус реактора, выйдет из строя система регулирования мощности и начнется неуправляемый разгон, то нетрудно представить себе последствия — спекшиеся от высокой температуры стержни с ураном, выход в атмосферу радиоактивности, выпадение ее на поселки и города.

Инженеры принимают меры, исключаяющие полчостью такие нежелательные сюрпризы. Реактор строят так, чтобы при любом повреждении любого существенного узла цепной процесс сам по себе останавливался.

Возникает и проблема удаления ядер-осколков, накапливающихся во время работы ядерных установок. Осколки — мощный источник ядерных излучений. Радиоактивность килограмма осколков превосходит мощность излучений 100 тысяч тонн богатой урановой руды! На первый взгляд цифра устрашающая. И все же ученые и инженеры нашли безопасные способы химической переработки ядерного горючего, способы надежного хранения радиоактивных отходов. Постоянно совершенствуются методы химического разделения продуктов ядерных процессов на отдельные элементы. Тем самым

расширяется область применений радиоактивных отходов. Иногда встречаются высказывания, что использование излучений осколков деления может быть не менее эффективным для народного хозяйства, чем и сама ядерная энергетика. Конечно, такие мысли не более чем крайность. Но нет дыма без огня. Несомненно, значение радиоактивных излучений осколочного происхождения со временем будет расти.

Дешевая энергия и пресная вода, добытые в изобилии, станут одним из важнейших факторов, обеспечивающих развитие коммунистического общества. С корабельных верфей сойдут быстроходные суда, способные совершать несколько кругосветных путешествий, не заправляясь горючим. С космодромов возьмут старт сверхмощные межпланетные ракеты. Их двигатели будут заряжены плутонием, накопленным в реакторах-размножителях, калорийность которого в миллионы раз превосходит химическую энергию лучшего обычного топлива. Ученые надеются, что в начале XXI века космические путешествия на Марс будут совершаться на кораблях, движимых энергией ядерного реактора. На ядерной энергии сможет работать система жизнеобеспечения космонавтов. Реакторы снабдят теплом, светом первые поселения людей на Луне и, возможно, на других планетах.



## УГЛЕРОДНАЯ ПАМЯТЬ

Синтез элементов происходит не только в отдаленных галактиках, в звездах и центре Солнца. В атмосфере самой Земли рождаются необычные атомы.

Атмосферу непрерывно бомбардируют потоки космических протонов — ядер водорода, летящих со скоростью, близкой к скорости света. Уже в верхних слоях атмосферы протоны сталкиваются с ядрами азота и кис-

лорода. При таких столкновениях сложные ядра азота и кислорода разрушаются и рождаются свободные нейтроны. Нейтроны, в свою очередь, взаимодействуют с веществом атмосферы и, конечно, чаще всего с ее основной составной частью — азотом. Иногда быстрый нейтрон выбивает из ядра азота протон и занимает его место. Происходит ядерное превращение: атом азота становится углеродным атомом. Только не обычным, а радиоактивным. В таком атоме на целых два нейтрона больше, чем в атоме самого распространенного изотопа углерод-12. Исторически радиоуглеродом принято называть углерод-14, хотя сегодня наберется десятков искусственных радиоактивных изотопов элемента № 6. Углерод-14 испускает ядерные электроны и со временем переходит в азот. За 5700 лет половина атомов радиоуглерода становится азотом.

Синтез радиоуглерода в основном протекает на высоте около пятнадцати километров. Во всей земной атмосфере за год образуется примерно семь килограммов радиоуглерода. Вспомним популярную задачу о сосуде с двумя отверстиями. В одно втекает, скажем, 7 килограммов воды в год, а в другое, проделанное в дне, вода вытекает. Вначале утечка мала, но с подъемом уровня воды повышается давление на днище сосуда и скорость утечки увеличивается. Наконец, когда в бассейне набирается 60 тонн воды, утечка становится равной притоку. Вода в бассейне остается на одном уровне. Шестьдесят тонн — равновесное количество.

То же самое происходит и с радиоуглеродом. Чтобы приток из атмосферы уравновешивался распадом, нужно 60 тонн углерода. Тогда в год будет распадаться 7 килограммов углерода. Столько же и накапливается в потоке космических частиц. В воздухе углерод окисляется и переходит в углекислый газ.

Двуокись углерода — одно из основных веществ, необходимых для возникновения живого организма. На каждый миллиард молекул двуокиси углерода, содержащихся в воздухе, приходится одна, в состав которой входит радиоактивный углерод. Радиоактивные молекулы усваиваются растениями, животными, человеком. Таким образом, углерод всего живого в определенной степени радиоактивен. Каждую секунду в грамме «живого» углерода африканского слона или белого медведя

происходит примерно 15 распадов углеродных атомов. Число распадов не зависит от географических координат. Взятый в Европе или Азии, на Антильских островах или в Карелии кусок живой ткани будет одинаково радиоактивным. Опыт показывает, что концентрация радиоактивного углерода одинакова во всем живом, населяющем нашу планету, хотя, на первый взгляд, белый медведь должен быть радиоактивнее слона — радиоуглерод образуется в полярных областях, прилегающих к магнитным полюсам. Попав в околоземное пространство, положительно заряженный космический протон движется вдоль силовых магнитных линий земного магнитного поля. Точнее, по винтовой линии, ось которой — силовая линия. Благодаря этому протоны попадают в атмосферу в области магнитных полюсов, где силовые линии «вонзаются» в земную поверхность. Там и возникают нейтронные потоки, протекают ядерные реакции, рождаются ядра не только углерода-14, но и трития — тяжелого радиоактивного водорода, бериллия с необычным числом нейтронов. Равномерное распределение радиоуглерода обеспечивает сама атмосфера: воздушный океан полностью перемешивается за пять, максимум десять лет — время, значительно меньшее потребного на установление радиоактивного равновесия углерода-14 в атмосфере.

Ученые в начале пятидесятых годов обратили внимание на два существенных обстоятельства: во-первых, организмы непрерывно усваивают из воздуха или с пищей двуокись углерода. Во-вторых, как только живой организм погибает, углеродный обмен с атмосферой, прямой или косвенный, прекращается. Таким образом, в тканях мертвых растений, в костях животных распавшийся радиоуглерод не пополняется и его концентрация становится все меньше и меньше. Следовательно, концентрация радиоуглерода связана со временем, прошедшим с момента гибели организма.

Писаная история человечества насчитывает несколько тысяч лет. Радиоуглеродные часы с заводом на тысячелетия как раз подходят для того, чтобы сложить отдельные фрагменты человеческой культуры в правильной последовательности.

Скорость распада углерода-14 вычисляют, измеряя время обычными часами. Допустим, в 100 году предмет

содержал 200 граммов радиоуглерода, а 5700 лет спустя, в 6700 году, в нем осталось половина — 100 граммов. Тогда говорят, что период полураспада углерода-14 равен 5700 лет.

На деле, конечно, период полураспада изотопа измеряют сразу. «Сразу» — означает несколько часов, иногда суток. Физику достаточно знать, сколько атомов изотопа  $X$  распадается за секунду, чтобы по простым формулам рассчитать период полураспада.

Период полураспада радиоуглерода одного порядка со временем существования человеческой культуры. Если бы углерод-14 распадался наполовину, допустим за 100 лет, то в деревянных изделиях Древней Греции не осталось бы никаких следов углеродной активности. Столетний изотоп пригодился бы для измерения возраста предметов не старше 1000 лет. С другой стороны, очень большой период полураспада, например миллион лет, означал бы, что в предметах тысячелетней давности число радиоактивных атомов практически не изменилось. Возраст египетских деревянных предметов определить бы не удалось. Таким образом, углерод-14 как будто бы нарочно создан для датировки человеческой истории. Особенную роль радиоуглеродный способ сыграл при изучении культуры Американского континента, где не было оставлено никаких письменных памятников, если не считать записей индейцев майя.

В середине сороковых годов американские ученые обнаружили пещеру, в которой оказался целый склад доисторической обуви: триста пар плетеных сандалий. В то время казалось, что дату их изготовления определить не удастся, хотя это и было очень важным для изучения истории человека на Американском континенте.

Прошло несколько лет — и доисторическая обувь попала в лабораторию физиков. По числу распадов углерода они установили возраст находки — он оказался равным 9000 лет.

Измерение числа распадов радиоуглерода — дело кропотливое. Процесс измерения начинается с того, что углерод, выделенный из изучаемого объекта, переводят в углекислый газ. Газом заполняют счетчик электронов, по своей конструкции ни в чем не отличающийся от первых счетчиков ядерных частиц, сконструированных Резерфордом и Гейгером. При распаде каждого атома



радиоуглерода вылетает электрон, который и будет зарегистрирован счетчиком. К сожалению, приборы реагируют не только на распад атомов углерода-14. Чувствительный счетчик, если его оставить открытым на лабораторном столе, буквально захлебнется от потока частиц, не имеющих ничего общего с распадом атомов радиоуглерода. Счетчик атакуют космические пришельцы: мезоны, гамма-лучи, быстрые протоны. На их фоне невозможно заметить редкие импульсы радиоуглеродсв. Поэтому счетчик окружают толстым — до полуметра — слоем железа. Но и в самом железе содержатся примеси радиоактивных атомов. Хотя этих атомов в железе немного, их излучение уменьшает точность измерений, особенно когда изучают предметы старше 10 тысяч лет. Приходится дополнительно защищать счетчик. На него надевают цилиндр, заполненный тщательно очищенной ртутью. Такая двойная шуба укрывает счетчик практически от всех излучений, за исключением мезонов. Мезоны слабо поглощаются веществом и проникают через любую защиту. Чтобы избавиться от мезонного фона, счетчик окружают вспомогательными счетчиками Гейгера. Мезон не может попасть в главный счетчик, минуя один из вспомогательных. Электронная аппаратура при прохождении мезона через главный счетчик одновременно регистрирует два импульса: импульс главного и одного из вспомогательных счетчиков. По этому признаку и исключают мезонный фон. Двойные импульсы не учитываются. Благодаря таким мерам удается определить возраст предметов, пролежавших в недрах Земли или на дне океана до 50 000 лет. Если из предмета можно извлечь большие количества углерода (для этого он должен быть достаточно велик) и на специальных установках по разделению изотопов выделенный углерод обогатить изотопом углерод-14, то возможности метода расширяются до 70 000 лет.

Во всех предыдущих рассуждениях подразумевалось, что концентрация радиоуглерода всегда (точнее — за отрезок времени, в котором применим радиоуглеродный метод) оставалась в атмосфере постоянной. Если бы по каким-то причинам скорость образования радиоуглерода в другие времена менялась, то и концентрация изотопа углерод-14 была бы переменной. Допустим, 10 тысяч лет назад в атмосфере было меньше радиоугле-

рода, чем в наши дни. Тогда в древних растениях первичная концентрация радиоуглерода была бы меньше, чем в современных. Число распадов на грамм углерода десятилетиями находок окажется меньше ожидаемого, измеренный возраст будет завышен.

Изменения притока углерода-14 в атмосферу пропорциональны колебаниям интенсивности космических лучей, падающих на Землю.

Какие же причины влияют на поток космических частиц? Энергичные протоны и другие составляющие космического излучения приходят к нам из далеких областей, находящихся вне Солнечной системы. Они отклоняются от Земли магнитным полем Солнца. Чем больше пятен на поверхности нашего светила, тем мощнее плазменные гейзеры, вырывающиеся из его недр, тем сильнее токи и магнитные поля, опоясывающие Солнце, тем большая доля протонов уходит в сторону от нашей планеты. В атмосфере количество радиоуглеродов начинает уменьшаться. Приходится вносить поправки.

На ближайшие от нас тысячелетия сделать исправления сравнительно просто. Оказывается, на Земле существуют очень древние живые организмы. Возраст американской колючей сосны достигает шести тысяч лет. Распилив поперек ее ствол, можно насчитать шесть тысяч годовых колец. Теперь, если взять пятидесятилетнее кольцо, считая от коры, то в нем будет содержаться углерод, усвоенный деревом пять тысяч лет назад. Можно измерить число распадов в этом веществе и по нему рассчитать истинную концентрацию радиоуглерода в атмосфере во времена образования кольца. На основании таких данных и вносят поправки в углеродную хронологию на ближайшие от нас пять-шесть тысяч лет.

Как-то раз углеродным методом мерили возраст травы, выросшей у обочины автодороги. Получалось, что трава растет здесь... несколько тысяч лет! Немного времени потребовалось, чтобы найти разгадку этого чуда. Придорожные растения вместе с природной двуокисью углерода усваивали углекислоту, попавшую в воздух из выхлопных труб автомобилей. В продуктах сгорания нефти радиоуглерод полностью распался — ведь нефть образовалась миллионы лет назад. Поэтому средняя концентрация радиоуглерода в траве и была

незначительной, соответствующей тысячелетним растениям.

Ошибки возникают и при датировке старинных деревянных строений. В старину дома часто перестраивались и в ход пускались уже бывшие в употреблении бревна.

Тем не менее метод радиоуглеродной датировки оказался весьма плодотворным и достаточно точным. Одна из наиболее интересных проблем, которая решена с его помощью,— установление хронологии изменений климата, происходивших за последние 40 000 лет. На этот отрезок времени приходится три ледниковых периода. Наступая на юг, льды все сметали со своего пути, под корень срезали вековые деревья. Скрытые ледниковыми наносами, дошли до нас остатки древней растительности. В их углеродной памяти сохранились даты продвижения континентальных льдов. Отступал перед ледниками и человек. Угли доисторических костров означают границы продвижения ледников. По распаду радиоуглерода в этих останках ученые и составили график движения льдов в периоды изменений земного климата.

Есть и другие удивительные возможности заглянуть в прошлое нашей Земли, добыть сведения о ее климате в далекие времена. По отношению изотопов кислорода, входящих в состав скелетов древних обитателей озер и морей, можно рассчитать температуру воды, в которой они жили. Существует определенная связь между температурой и отношением концентраций изотопов кислород-18 и кислород-16. Если, вдобавок, из изучаемых скелетов выделить углерод и определить их возраст, то в наших руках окажутся сведения о температуре океана в отдаленные эпохи. Средняя температура воды характеризует климат на планете. По этим данным ученые пришли к заключению, что последние 10 тысяч лет не было похолоданий, а в течение предыдущих 27 тысяч лет температура Земли была ниже современной.

Таким образом, распад атомных ядер помог решить фантастические задачи: измерить возраст деревянных изделий, изготовленных человеком десятки тысяч лет назад, определить температуру водоемов во время ледниковых периодов. Уголь древних очагов рассказал ученым и о том, что на Американском континенте человек появился примерно 10 400 лет назад.

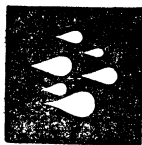
Однажды в начале века английским археологам сообщили о находке неподалеку от небольшого старинного городка Пилдтауна черепа и других костей скелета древнего человека. По земным слоям, в которых были погребены доисторические кости, форме зубов и черепа ученые определили их возраст. И с этого момента родилась загадка пилдтаунского человека. Скелет оказался самым древним из когда-либо обнаруженных на территории Англии, гораздо старше 10 тысяч лет! А ведь по всем другим данным первые люди ступили на острова нынешней Великобритании впервые 10 400 лет назад. Опровергались, казалось бы, твердо установленные наукой факты...

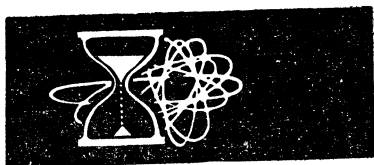
С появлением радиоуглеродных часов дата рождения, вернее смерти, пилдтаунского человека была уточнена. В счетчик бета-частиц поместили углерод из его костей, и неожиданно бета-частицы посыпались как из рога изобилия — 14 распадов на грамм! Концентрация углерода-14 в костях древнейшего пращура была такой же, как и у лаборантки, заносившей в журнал измеренные числа распадов.

Когда к подозрительному скелету пригляделись повнимательнее, выяснилось — скелет специально обработан, чтобы ввести в заблуждение археологов.

Радиоуглеродный метод внес большой вклад в разработку ранней истории человечества и зависимости ее от климатических изменений. Установлены даты многих интересных событий: вулканических извержений, исчезновения многих древнейших животных, таких, как мастодонт или гигантский ленивец.

Для временных масштабов, соизмеримых с возрастом нашей планеты, для датировки геологических эпох нужны часы, стрелки которых могли бы отсчитывать миллионы и миллиарды лет.





## ЯДЕРНОЕ ВРЕМЯ

Человек живет на Земле уже около 500 тысяч лет. Органическая жизнь возникла на нашей планете примерно миллиард лет назад. Ископаемых животных и ископаемые растения изучают палеонтологи. Они восстанавливают последовательность событий, последовательность развития жизни по чередованию пластов земной коры. Скелеты и отпечатки древних организмов на камнях рассказывают им об эволюции жизненных форм. Однако по земным пластам узнать абсолютное время событий весьма сложно, хотя примерные оценки иногда и удается сделать. Еще труднее определить возраст горных пород. Нужны часы с гораздо большим запасом хода, чем радиоуглеродные.

Медленно, каплями, сочится вода из отверстия в дне золоченой чаши и наполняет другой сосуд с горизонтальными полосами-метками. Вот вода достигла верхней черты. Отсчитана еще одна единица времени.

Так, по скорости истечения воды определяли время в Древнем Египте и других странах: Вавилоне, Греции.

Почти так же, как водяные часы—древние клепсидры, действуют и радиоактивные часы, основанные на распаде изотопов нестабильных элементов. В радиоактивных часах атомы одного химического элемента «перетекают» в атомы другого. Только чаша клепсидры опорожняется за время, измеряемое часами, а «материнские» атомы урана-238, тория-232, рубидия-87, калия-40 стекают по желобу ядерных превращений за многие миллиарды лет. Чем больше атомов исходного материнского изотопа перешло в дочерний, тем более длительное время происходил распад.

Природный уран в незначительных концентрациях содержится во многих минералах. Уран-238 за 4,5 миллиарда лет наполовину переходит в свинец. Если из мине-

рала выделить уран и свинец, то по их отношению можно узнать время, когда образовался минерал. Конечно, при этом нужно быть уверенным, что система была замкнутой: с момента образования минерала уран из него не вымывался и не поступал из каких-то внешних источников. То же самое относится и к свинцу.

На деле все обстоит еще сложнее. Ведь земной свинец образовался не только в результате распада урана или тория. Кроме такого, как говорят физики, радиогенного, в земной коре содержится и свинец, ядра которого, как и ядра других элементов, родились в ядерных реакциях, протекавших во времена синтеза элементов Солнечной системы. Самая сложная проблема датировки минералов ураново-свинцовым методом и заключается в определении доли первозданного свинца в урановой руде, с тем чтобы учесть его при определении возраста руды.

Остановимся несколько подробнее на процессе распада изотопов природного урана. У каждого из них своя сложная цепь радиоактивных превращений. Атомные ядра этих цепей испытывают два вида радиоактивного распада: альфа-распад, о котором мы уже говорили, и бета-распад.

На первом этапе уран-238 становится радиоактивным торием, затем легким изотопом урана... В конечном итоге, испытав за 4,5 миллиарда лет свыше десятка превращений, половина урановых ядер переходит в стабильный свинец-206. Уран-235 по другой цепи превращений, в свою очередь, становится изотопом свинец-207. На каждое превращение урана-238 в свинец рождается восемь альфа-частиц, а на каждое превращение урана-235 в свинец — семь. Альфа-частицы тормозятся в веществе и становятся атомами гелия.

На заре развития ядерной физики, в 1907 году, американский ученый Болтвуд, работавший в то время в английском городе Манчестере под руководством Эрнеста Резерфорда, предложил определять время рождения минералов, в состав которых входит уран, по содержанию в них гелия.

Еще в 1904 году Резерфорд писал: «Рассмотрим ради примера очень плотный минерал, в котором гелий непрерывно образуется из радия, но не может просочиться наружу. Содержание гелия в минерале со временем постепенно увеличивается, и общее его количество должно

быть пропорционально возрасту минерала и содержанию в нем радия. Если скорость образования гелия из радия равна указанной величине, то можно подсчитать достаточно точно, что минерал торинит имеет возраст, по крайней мере, 500 миллионов лет, что равно времени, прошедшему с момента формирования данного минерала в земной коре. Это минимальная оценка, так как, вероятно, некоторое количество гелия с течением времени выделилось из минерала. Подобные же результаты были получены при исследовании других радиоактивных минералов... Я уверен, что когда константы, используемые в этих расчетах, будут точно определены, то этот метод окажется наилучшим методом точного определения возраста радиоактивных минералов». В 1904 году еще не были достаточно полно изучены цепи радиоактивных превращений урана. Поэтому Резерфорд говорит о радии. Количество радия пропорционально урану, содержащемуся в минерале. Правильнее учитывать альфа-частицы, рождающиеся во всех звеньях цепи распада уран—свинец.

Уже в те времена было доказано, что при любых возможных на Земле условиях — температуре, давлении, в любых химических соединениях строго поддерживается постоянная скорость радиоактивного распада. Поэтому чем больше в минерале на единицу массы урана приходится гелия, тем он старше. Из килограмма урана за 4,5 миллиарда лет выделяется 60 граммов гелия. Возраст слоев земной коры, если они сложены из очень плотных пород, удерживающих гелий, можно определить этим методом.

Засевшие в кристаллической решетке минерала атомы гелия извлекают, предварительно раздробив породу. Мельчайшие частицы поступают в химическую переработку — вещество растворяют в кислотах и раствор кипятят. Гелий постепенно выделяется из нагреваемого раствора и его собирают. Извлекают из раствора и уран. Количества гелия и урана — исходные данные для расчета возраста горных пород.

Палеонтологи, определив по ядерным часам даты отложения земных пластов, добывают сведения о периодах обитания доисторических животных — причудливых чудовищ, населявших Землю миллионы лет назад. Датируются, как правило, не останки самих ископаемых живот-

ных, а окружающие отложения продуктов жизненной среды, в которой они обитали. Поэтому ядерно-физические и геологические исследования идут рука об руку.

Удается определить периоды обитания таких ископаемых, как арсинитериум или птеродактиль, населявших Землю соответственно 40 и 180 миллионов лет назад. Задача решается, как правило, другими средствами — во многих случаях гелиевый метод ненадежен. За многие миллионы лет, которые минерал пролежал в земном пласте, часть солнечного газа из него улетучится. Учесть утечку практически невозможно. Тем более что за гелием прочно удерживается слава самого необычного, самого текучего и проникающего газа.

Не всегда пригоден и уран-свинцовый метод. Нелегко бывает узнать долю свинца радиогенного происхождения. Ведь в породе зачастую примешаны и свинцовые изотопы, родившиеся в процессе синтеза элементов Солнечной системы, да еще иногда примеси урана и тория встречаются одновременно. Нужно уметь отличить свинец ториевого происхождения от уранового свинца. В цепи распада урана на пути к свинцу встречается и благородный газ радон. Если порода пористая, то радон — продукт распада примесного урана — выйдет из минерала и где-то в другом месте превратится в свинец. Измеренный возраст окажется меньше истинного.

Точность уран-свинцового метода и его надежность повышаются благодаря масс-спектрометрическим измерениям. Масс-спектрометр сортирует радиогенный свинец по отдельным изотопам. У каждого из них свое происхождение. Свинец-206 накопился из урана-238, свинец-207 — потомок урана-235, а свинец-208 — продукт распада тория-232.

Изотопный анализ дает возможность учесть при определении возраста первичный свинец. Дело в том, что в природных минералах вкраплен свинец-204, который не возникает в цепях превращений ни одного из природных радиоактивных элементов. Иными словами, ядра свинца-204 только первичного происхождения. Изотопный состав первозданного свинца (отношение количеств изотопов в данном химическом элементе) неизменен и был определен после масс-спектроскопического анализа железных метеоритов, в которых нет ни урана ни тория и радиогенный свинец не мог накопиться. Стало возмож-



ным по количеству свинца-204 определять полное содержание первозданного свинца в изучаемых породах и вносить требуемую поправку.

Свинцовый способ, после его дополнения изотопным анализом, стал надежным средством определения времени возникновения горных пород. Если возраст породы не очень велик, то точность метода становится недостаточной — за это время лишь незначительная доля урана переходит в свинец. Ничтожная примесь радиогенного свинца не позволяет определить возраст такой породы.

Но вот минерал, в котором никогда не было урана. Как отмерить прожитые им годы?

Во многих важных для геологов случаях выручают калиевые соединения. Их содержат такие распространенные минералы, как полевые шпаты и слюды.

Изучение изотопов калия привело к неожиданному открытию. Калий с атомным весом сорок оказался радиоактивным, с периодом полураспада, подходящим для датировки геологических эр. Изотоп калий-40 испытывает бета-распад и превращается в распространенный изотоп кальция. Кальций радиогенного происхождения отделить в минералах от кальция первозданного, образовавшегося во время синтеза элементов Солнечной системы, невозможно: элемент слишком распространен в природе и небольшую добавку радиогенного кальция учесть нельзя. Но в распаде калия-40 есть одна замечательная особенность. Его ядро может не только испускать ядерный электрон и при этом переходить в устойчивый кальций, но и захватывать с орбиты своей оболочки электрон и превращаться в аргон — элемент с низшим атомным номером. Аргон в минералах только радиогенного происхождения. Первичный аргон «выкипел» еще из расплавленного вещества Земли и, будучи инертным газом, при образовании земной коры остался в атмосфере. Ведь создать твердое вещество, в которое входит аргон, химики сумели совсем недавно. Синтетические соединения аргона крайне неустойчивы и в природных условиях распадаются. Поэтому, если удалось определить количество аргона в породе, то нетрудно рассчитать и ее возраст.

Калиево-аргонные ядерные часы намного точнее гелиевых. Потери аргона за геологические времена не очень велики — аргон менее подвижен, чем гелий. И все

же утечкой аргона пренебрегать нельзя. Возьмем обычный гранит. Он сложен из калиевого полевого шпата и слюды. Отделив слюду от шпата, выделим из них аргон, измерим количество калия-40 в том и другом минерале и вычислим возраст. И здесь нас встречает неожиданность. Шпат оказывается моложе слюды. Но ведь образовались они одновременно. В чем тут дело?

Слюда прочнее удерживает аргон, и кажущаяся молодость шпата — результат утечки. Напрашивается вывод — шпаты не годятся для измерения возраста.

Советские ученые выяснили, что в некоторых видах полевого шпата аргон сохраняется почти без потерь, когда в других утечка слишком велика. Поэтому, если отделить хорошо удерживающие аргон шпаты и пользоваться только ими при оценке прожитых породой лет, то ошибка будет устранена. Калиево-аргонным способом датируют породы, начиная с возраста 100 тысяч лет и выше. Свинцово-урановому методу доступны только времена, исчисляемые, как минимум, миллионами лет.

За последние годы разработан еще один метод определения геологического возраста. После радиоактивного распада изотопа рубидий-87 образуется стронций. Возраст геологических эр определяют по отношению стронция к рубидию в минералах, в которых первозданный стронций не содержался. Это прежде всего слюды — мусковит, биотит, лепидолит. Стронциевым методом определяют возраст древнейших гранитов и слюд. Рубидий медленно распадается в стронций, — должно пройти 50 миллиардов лет, чтобы половина рубидия перешла в стронций. Возраст пород, которые моложе 5 миллионов лет, стронциевыми часами уже не измерить, — они слишком грубы для такого промежутка времени.

Когда земной шар остывал, атомы вещества стали формироваться в твердые тела. Возникали кристаллы, в которых атомы застывали в строгом порядке. Только в плотных твердых телах продукты радиоактивного распада оставались рядом с материнскими ядрами. В жидком расплаве атомы свободно перемешивались, и, так как у продуктов распада химическая природа совсем иная, чем у материнских ядер, дочерние ядра концентрировались в других местах. Все методы, о которых мы рассказывали, отсчитывают возраст вещества, начиная с момента его кристаллизации.

В последние годы стали применяться ядерные часы, основанные на самопроизвольном или, как чаще говорят, спонтанном делении урана. По сравнению с другими видами распада деление — редкий процесс.

Среди миллиона малых ядерных катастроф, когда из тяжелого урана вылетают легкие альфа-частицы, происходит «большой взрыв» — уран сам по себе разваливается на два ядра-осколка. Заряженные положительно, осколки отталкиваются друг от друга, разлетаются с громадной скоростью, внедряются в структуру твердого тела и оставляют за собой след — смещенные со своих мест атомы.

Осколочные следы практически не затушевываются другими повреждениями.

Новый метод позволил изучить возраст древних природных стеклоподобных образований, некоторых метеоритов. По следам деления определены концентрации урана и возраст очень мелких зерен различных материалов.

Метод датировки по следам осколков деления применим в очень широком интервале времени: можно с высокой точностью определить и дату образования слюды, возраст которой несколько сот миллионов лет, и время изготовления вазы из уранового стекла, отлитой в прошлом веке. Дело в том, что регистрируются отдельные акты распада. Достигается громадная чувствительность. Один микрограмм радиогенного свинца — количество, с трудом обнаруживаемое химическими способами, — накапливается, когда  $2,5 \cdot 10^{15}$  ядер урана — число астрономическое — проходят по долгой цепи превращений.

Зато зарегистрировать следы урана в веществе удается по нескольким десяткам самопроизвольно разделившихся ядер.

Загадка возраста Земли волновала человечество с незапамятных времен. По библейским текстам, наша планета сотворена 6 тысяч лет назад. Древние халдеи, жившие в Месопотамии, считали, что Земле два миллиона лет.

Когда ученые стали оценивать возраст земного шара, то они сразу поняли, что речь должна идти о многих десятках или даже миллиардах лет. Известный английский физик Вильям Томсон, позднее лорд Кельвин, подсчитал, что если в момент образования Земля была нагрета так же, как Солнце, то до теперешней температуры

она должна была остывать 24 миллиона лет. Лорд Кельвин в своих расчетах не учитывал дополнительного тепла, выделившегося в Земле благодаря распаду радиоактивного вещества. А учесть следовало. Громадное количество тепла освободилось после распада радиоактивного калия-40 и других изотопов. Поэтому в дальнейшем оценка времени, которое пошло на образование на Земле твердой коры, непрерывно повышалась — сначала до 200 миллионов лет, а затем и до двух миллиардов.

Возраст самых древних горных пород и равен времени, прошедшему с момента образования устойчивой земной коры до наших дней. Теперь если к возрасту древнейших минералов прибавить время, необходимое для образования твердой коры на жидком земном сфероиде, вычисленное современной счетной машиной, то получится полный возраст Земли.

Древнейшие породы залегают под громадными толщами отложений. Только в некоторых местах они выходят на поверхность. Такие места геологи называют докембрийскими щитами. Есть они и на территории Советского Союза — в Карелии, на Украине. Возраст древнейшей гранитной плиты, исследованной на Кольском полуострове, насчитывает 3,4 миллиарда лет.

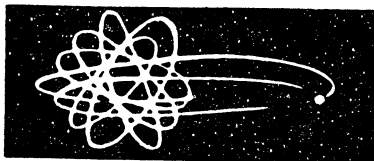
Получается, что полный возраст планеты, на которой мы обитаем, порядка пяти миллиардов лет.

Можно измерить и по-другому возраст Земли. Считается, что метеориты возникли одновременно с Землей. Будучи малыми по объему, они очень быстро остывали, и отсчитанное ядерными часами время жизни метеоритов практически совпадает с возрастом Земли. Ведь свинец затвердевшего метеорита, образовавшийся из урана, не мог переместиться куда-либо в другое место.

Когда измерили концентрацию урана и свинца в каменных метеоритах (только в них содержится уран), в их паспортах в графе «возраст» появились цифры, близкие к пяти миллиардам лет. Два разных способа дали одинаковые результаты. Ныне принято считать возраст Земли несколько большим пяти миллиардов лет, и вряд ли в будущем произойдут существенные уточнения.

Итак, распад атомного ядра помогает человечеству решить многие научные проблемы, связанные с историей Земли, строением земной коры, с изучением распределения полезных ископаемых.

«Мы перестали верить в неизменяемую вечность атомов, все течет, все изменяется, все разрушается и вновь создается, одно отмирает, другое рождается,— так течет история химических процессов мира во времени. Но даже и смерть атома человек сумел превратить в орудие познания мира и сделал из нее эталон времени»,— писал академик Ферсман.



## ЯДЕРНЫЕ ПРИБОРЫ

Для быстрого развития минерально-сырьевой базы Советского Союза, предусмотренного Директивами XXIV съезда КПСС, необходимо совершенствовать методы разведки полезных ископаемых, методы анализа минералов.

Приборы, основанные на ядерных излучениях, открыли новые пути к полезным ископаемым. Весьма эффективен для разведки так называемый нейтронный карротаж нефтяных пластов.

В нефтеносных районах пласты породы, пропитанные нефтью, могут залегать один над другим. Иногда ресурсы старых нефтяных скважин остаются неиспользованными до конца. Из глубокого пласта вся нефть откачана, а в верхних еще лежит нетронутая нефть, не замеченная когда-то геологами. Как обнаружить нефть в верхних пластах?

Стенки старой скважины защищены толстой стальной трубой. Нужно как-то ухитриться увидеть сквозь металлическую стенку нефть. Единственное средство, годное для зондирования,— нейтронные потоки. В скважину опускают специальный генератор быстрых нейтронов. Основа генератора — ускоренный высоким напряжением пучок ядер дейтерия, тяжелого водорода. Дейтерий падает на мишень, содержащую тритий, еще более тяжелый радиоактивный изотоп водорода. В столкновении уско-

ренных ядер дейтерия и трития возникают быстрые нейтроны. Генератор работает в импульсном режиме. Сгустки быстрых нейтронов легко проходят через стальную трубу и проникают в пласт породы, окружающей место заглубления генератора. Часть нейтронов отражается веществом пласта на нейтронный счетчик, который опускают вместе с генератором. Особенно много нейтронов попадает на счетчик, когда он достигает нефтяного пласта. И не только велико число отраженных нейтронов, но и поступают они на счетчик длительное время, в несколько раз больше длительности первичного импульса. По интенсивности и длительности геологи уверенно находят новый нефтяной пласт, изучают его структуру.

Нефть хорошо отражает нейтроны и затягивает отраженный нейтронный импульс, потому что в ее состав входят водородсодержащие молекулы. Водород, как мы знаем, эффективно замедляет нейтроны, и они надолго запутываются в сложных нефтяных молекулах. Поэтому импульс и растягивается во времени. Нефть не загрязнена примесями, жадно поглощающими нейтроны, и на счетчик приходит интенсивный импульс. На первый взгляд, нейтронный разведчик может спутать воду с нефтью. Чистая вода еще лучше, чем нефть, замедляет и отражает нейтроны. Но никаких ошибок не происходит. Дело в том, что в скважинах нефтяных месторождений вода основательно засолена, а в состав солей входят атомы металлов — активных пожирателей нейтронов. Поэтому отражает нейтроны засоленная вода очень слабо.

Ядерными методами выявляют в горных породах малейшие примеси элементов. И опять помогают нейтроны. Исследуемый образец облучают интенсивным нейтронным потоком. Стабильные ядра определенного сорта становятся неустойчивыми и, распадаясь, излучают присущие только им гамма-кванты. Радиоактивность регистрируется специальными кристаллами, преобразующими ядерные гамма-кванты в световые, или германиевыми полупроводниковыми счетчиками гамма-излучения, в которых энергия гамма-квантов переходит в электрические импульсы. И кристаллы и германиевые счетчики — хорошее средство для определения с очень большой чувствительностью изотопов по характеру их излучения. Таким способом несложно обнаружить присутствие в рудах редкоземельных элементов, легко производить анализы

пород на медь, молибден, палладий. Недостаток нейтронного анализа ископаемых, долгое время сдерживавший его применение, связан с трудностью облучения минералов в полевых условиях достаточно интенсивным нейтронным потоком. Теперь созданы специальные перевозные ядерные реакторы-мультипликаторы, в которых цепная ядерная реакция поддерживается нейтронным источником. Мультипликатор безопасен в любых условиях эксплуатации и во время транспортировки. Как только внешний источник удаляют, реакция глохнет. На довольно сложном, громоздком мультипликаторе получают сравнительно скромный поток нейтронов — несколько десятков миллиардов в секунду. Столько же нейтронов генерирует крупинка искусственного элемента калифорния весом в несколько миллиграммов. Калифорниевый компактный источник нейтронов из вещества, накопленного в ядерном реакторе, — большая ценность для нейтронного анализа. Несомненно, что в определенных условиях с миниатюрными источниками можно будет вести и разведку нефтяных месторождений.

Нефтяные месторождения по земному шару распределены неравномерно, да и положение их, как правило, не совпадает с промышленными центрами. Нефти нет под Москвой, а на севере Тюменской области богатейшие запасы. У такой страны, как Италия, нет своих нефтяных месторождений промышленного значения. Поэтому зачастую нефть приходится доставлять на большие расстояния. На море транспортировка решается постройкой гигантских танкеров. Сложнее перевозить нефть по сухопутным дорогам. Самый лучший сухопутный способ доставки — нефтепровод. В прежние времена перекачка горючего разным потребителям по одному и тому же проводу вызывала значительные неудобства.

В наши дни на разные сорта горючего научились ставить радиоактивное тавро. Так, скажем, когда кончается подача горючего на завод, в трубопровод добавляют малое количество радиоактивного вещества. У приемного резервуара стоит счетчик, регистрирующий излучение примешенного изотопа. Как только появилась радиоактивность, резервуар отключают, а горючее направляется другому потребителю. Распределение осуществляется автоматически, приводы, управляемые радиоактивными счетчиками, сами переключают нужные вентили.

Для маркировки подбираются такие изотопы, излучение которых не грозит опасностью человеку. Обычно их периоды полураспада невелики, и радиоактивность после их применения быстро исчезает.

Сравнительно недавно ответственные детали проверяли выборочным способом. Вместо двух отливок ротора электрического генератора делали три. Одну из них разрезали на части, и если в ней не было дефектов, то считалось, что и две другие, изготовленные в таких же условиях, не содержат ни трещин, ни раковин. Нечего и говорить, насколько дорог и вместе с тем ненадежен такой способ контроля. Конечно же, хорошее качество одной детали или даже нескольких не обеспечивает полностью высокое качество остальных. Во многих случаях желательна полная гарантия. Представьте себе, что в роторе современной турбины есть трещина. Центробежные силы непременно разорвут вращающийся с огромной скоростью ротор. Его массивные части разлетятся со скоростью артиллерийского снаряда, разрушат здание, могут погубить людей.

Сегодня таких катастроф не происходит. Любое ответственное изделие из металла — будь то сварные швы котла высокого давления или ротор турбины, надежно проверяется гамма-дефектоскопом. Нет нужды резать швы или разрушать поковку ротора, чтобы убедиться в надежности изготовленных узлов. Гамма-лучи радиоактивного кобальта проникают сквозь большие толщи металла. Контролируемая деталь помещается между кобальтовым источником и фотопленкой. «Кобальтовые» лучи проходят сквозь деталь и поглощаются металлом. В тех частях детали, где находятся пустоты и трещины, поглощение меньше, и пленка облучается неравномерно. Напротив мест, где были трещины и раковины, на проявленной фотоэмульсии появляются темные пятна, потому что сюда попадают более интенсивные пучки гамма-лучей.

Гамма-дефектоскопия — хорошее средство проверки прочности элементов мостов, корпусов кораблей, герметичности газопроводов.

Быстро летит между вальцами прокатного стана стальная лента. И все малейшие изменения ее толщины известны оператору, хотя у него нет ни микрометра ни других мерительных инструментов. Да и как измерить



толщину ленты, не останавливая ее бег? Вдоль прокатного стана устанавливают источник гамма-лучей и счетчик радиации. Между счетчиком и источником движется прокат. Интенсивность импульсов излучения, регистрируемая счетчиком, возрастает с уменьшением толщины ленты, приборы преобразуют полученные данные в миллиметры и передают на пульт управления или автоматическое устройство, регулирующее работу стана.

В процессе золочения изделий желательнее наносить золотое покрытие вполне определенной толщины. Но как измерить золотой слой, уже нанесенный на контакты электронных блоков современного компьютера? Золоченую поверхность облучают быстрыми бета-частицами — ядерными электронами, испускаемыми радиоактивным изотопом. Золото тяжелый металл. В его атомном ядре 79 протонов — значительно больше, чем в покрываемых металлах. Вещество тем сильнее отражает электроны, чем больше протонов в его атомных ядрах. Поэтому отражательная способность золоченой поверхности в сильной степени зависит от толщины золотого покрова. Приборы регистрируют число электронов и по степени их отражения измеряют микронные покрытия с большой точностью, скоростью и, главное, без всяких повреждений защитного золотого слоя.

Производительность многих важнейших процессов текстильной промышленности зависит от скорости подачи ткани. Барабаны с тканью могли бы вращаться с очень большой скоростью, но... барабан напоминает старинную электрическую машину, построенную немецким изобретателем Отто фон Герике. В машине Герике электричество накапливалось на большом изолированном крутящемся шаре, когда его поверхность натерли сукном. Так же как и шар старинной электрической машины, барабан при большой скорости вращения заряжается до высокого электрического потенциала. Рано или поздно между бобиной барабана и другими деталями проскакивает электрическая искра и возникает пожар.

Нельзя ли найти способ постепенно разряжать барабан, без остановки производственного процесса?

Выручает мощный источник альфа-частиц, помещенный рядом с бобиной. Альфа-частицы ионизируют окружающий воздух, его проводимость возрастает, и заряд стекает на землю. Такой способ не только обеспечивает

безопасность. Увеличивается скорость подачи ткани, а значит, и производительность фабрики.

Многие тысячи жизней спасены излучением радиоактивного кобальта. Но ядерные излучения служат основой и для более тонких медицинских приборов. За последние годы созданы стимуляторы сердечной деятельности, рассчитанные на непрерывную работу в течение многих лет. Главный элемент стимулятора — миниатюрный источник ядерной энергии, заряженный легким изотопом плутоний-238. Легкий плутоний испускает интенсивные потоки альфа-частиц. Энергия альфа-частиц рассеивается в веществе и переходит в тепло.

При распаде одного атомного ядра плутония выделяется громадная энергия. Столько же тепла освобождается при окислении нескольких миллионов атомов углерода. В ампуле с пятьюдесятью граммами плутония-238 развивается тепловая мощность 28 ватт. Заметим для сравнения, что максимальная мощность свинцового аккумулятора такого же веса — всего четверть ватта. Велик запас энергии в плутониевом аккумуляторе. Он уменьшается наполовину лишь за 90 лет. Поэтому вживленный в организм больного стимулятор не требует перезарядки — его энергии хватает на всю жизнь.

Существует немало ядерных излучателей с подобными энергетическими характеристиками, но одна особенность делает легкий изотоп плутония незаменимым. Обычно альфа-распад сопровождается сильным гамма-излучением, проникающим через большие толщи вещества. Плутоний-238 — одно из немногих исключений. Энергия гамма-квантов, излучаемая после его альфа-распада дочерними ядрами, сравнительно невелика, и защититься от плутониевых гамма-лучей несложно — их поглощает тонкая металлическая стенка контейнера малого веса.

За последние годы был создан проект искусственного сердца, питаемого энергией альфа-частиц плутония-238.

В некоторые приборы иногда помещают небольшие количества америция-241. Вылет альфа-частицы из ядра америция сопровождается гамма-излучением с энергией 60 тысяч электрон-вольт. Крошечный препарат америция и детектор гамма-лучей, расположенные должным образом, позволяют определить по поглощению гамма-квантов толщину металлической пластины и уровень жидко-

сти. Если из ближайших к атомному ядру электронных орбит каким-то образом удален электрон, то за очень короткое время его место займут периферийные электроны. Перемещение электронов не проходит бесследно, атом испускает квант рентгеновского излучения, энергия которого пропорциональна квадрату атомного номера элемента. Поток таких квантов называют рентгеновским характеристическим излучением.

Америциевым препаратом можно надежно определять концентрацию того или иного элемента. Его мощность излучения не зависит ни от каких внешних факторов. Поток гамма-квантов медленно изменяется во времени — период полураспада америция 475 лет, и можно пренебречь уменьшением активности препарата благодаря распаду.

Если кусочек америция поднести к щитовидной железе человека, то гамма-лучи америция начнут вырывать электроны из атомов щитовидной железы. Химические элементы каждого ее участка будут испускать свои характеристические рентгеновские лучи. По числу иодных характеристических квантов, отобранных и сосчитанных полупроводниковым детектором, можно определить концентрацию иода в тканях того или иного участка. В руках врача окажется картина распределения иода по железе. По ней и определяют состояние больного. Внешнее облучение с успехом заменяет процедуру, когда в организм больного вводят радиоактивный изотоп иода и после его усвоения изучают распределение введенного иода по щитовидной железе. Теперь, с разработкой нового метода детектирования иода, в организме не задерживается остаточная радиоактивность, и доза облучения пациента значительно уменьшается по сравнению со старым способом диагностики.

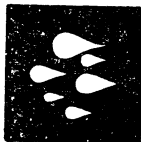
В будущем предполагается по характеристическому излучению определять атомные номера короткоживущих далеких элементов. Ныне разработана методика измерения атомного номера по распаду одиночного атома. Известно, что все далекие элементы, такие, как, например, элемент 110, должны испускать альфа-частицы. При этом электронные оболочки атомов дочернего ядра — 108-го элемента — будут разрушены альфа-частицей, вылетевшей из ядра. При восстановлении внутренней оболочки

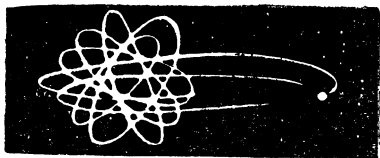
атом испустит характеристические лучи элемента 108, заряд ядра после альфа-распада уменьшится на две единицы. Следовательно, характеристические кванты элемента 108 будут сигнализировать о рождении атома 110-го. Такой элементный анализ отличается невероятной быстротой, если его сравнивать с обычными методами, в принципе можно регистрировать атомы со временем жизни, меньшим миллионной доли секунды.

Ученые полагают, что некоторые опухоли можно успешно разрушать нейтронным излучением. Для этой цели были изготовлены специальные иглы, в остриях которых содержится несколько микрограммов калифорния. Крошечный нейтронный источник вводится вместе с иглой непосредственно в опухоль и разрушает ее, оказывая сравнительно слабое влияние на другие части организма.

Нейтронный микроисточник открывает новые пути и для изучения внутреннего строения мягких тканей. Рентгеновские лучи хорошо выявляют структуру скелета и чужеродные тела в организме. Но собственные изменения в глубине мягких тканей, например мышц, на экране рентгеновского аппарата не проявляются. Нейтронный «рентген» дополняет диагностику: в отличие от рентгеновских квантов нейтроны сильно рассеиваются ядрами легких элементов, особенно водородом, входящим в молекулы органических тканей. По характеру рассеяния несложно выяснить тканевую структуру.

Обширна область применения ядерных излучений и их индикаторов. Здесь и разведка полезных ископаемых, и лечение заболеваний человека, и исследование процессов фотосинтеза, и испытание на прочность поршневых колец двигателей, и изучение процессов доменной плавки, и взвешивание железнодорожных вагонов. И многое, многое другое. Причем область применения ядерных излучений и ядерных приборов непрерывно расширяется.





## ИЗЛУЧЕНИЯ И НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ

До изучения физиками тонких процессов взаимодействия ядерных излучений с клетками живых организмов никто и не подозревал о громадном влиянии мощных гамма-квантов, быстрых альфа- и бета-частиц на развитие земной жизни.

Еще в первых опытах с радиоактивными веществами было установлено, что большие дозы облучения опасны для организма человека. Анри Беккерель, открывший естественную радиоактивность, погиб, облученный урановым препаратом, который он носил в кармане сюртука. Продолжительное облучение жесткой радиацией вызывает возникновение раковых опухолей, приводит к тяжелому заболеванию крови. И наоборот, слабая доза гамма-лучей может остановить рост злокачественных образований. Из этого видно, как не прост механизм воздействия ядерных излучений на организм. Тем не менее общие изменения, происходящие с клеткой в потоке гамма-лучей, хорошо известны: это разбухание ядра и всей клетки, разрушение клетки, увеличение вязкости протоплазмы и проницаемости клеточной оболочки.

Но это одна сторона проблемы. Есть и другая — влияние радиации на наследственный аппарат.

Наследственные признаки у человека, животных и высших форм растений передаются хромосомами, входящими в зародышевые (половые) клетки. В хромосомах находится множество невидимых даже сквозь самую сильную оптику частиц — генов, материальных носителей конкретных наследственных признаков. Гены сцеплены в определенные группы, число которых соответствует числу хромосом. Все клетки всех организмов данного вида содержат строго одинаковый набор хромосом. В клетках человеческого тела, например, их 46. Одна половина хромосом наследуется от матери, другая —

от отца. И происходит это во время слияния половых клеток (которые в отличие от обычных имеют не полный, а половинный набор хромосом) и образования зиготы — оплодотворенного яйца, из которого развивается зародыш, несущий в себе все признаки будущего организма. Таким образом, все признаки потомства комбинируются из признаков, «записанных» в родительских генах. Это всеобщий закон, открытый знаменитым чешским ученым Менделем, уточненный и развитый последующими поколениями генетиков, биологов и биохимиков.

Одно из самых существенных достижений генетики после Менделя — это разгадка механизма мутаций, изменений наследственных признаков, которые в значительной мере обуславливают эволюцию живого. Мутации — основной фактор, вызывающий появление совершенно новых признаков у потомства.

В чем же причина мутаций? Чтобы изменить строение гена, надо перестроить его структуру — переставить, скажем, в его молекулах несколько групп атомов местами. Такая операция возможна с помощью некоторых химических веществ, Например, иприт, сильное отравляющее вещество, действует на структуру гена. Той же цели можно достичь и с помощью проникающей радиации. Ведь энергия, необходимая для разрыва молекулярных связей, в миллион раз меньше энергии ядерного кванта или частицы ядерного излучения.

Гамма-кванты и нейтроны легко проникают в клетки живого организма и вносят в структуру белковых молекул необратимые изменения. В наследственной программе, «записанной» в генах, появляются как бы «опечатки», меняющие смысл, порой — значительно, отдельных «фраз» — от роду заданного признака. Если такие «опечатки» появляются в соматических клетках (сома — тело, то есть составляющих структуру самого организма), то они потомству данного организма не передаются. Иное дело — половые клетки: здесь изменение наследственной программы влечет за собой передачу нового признака потомству. Но когда этот признак даст о себе знать, зависит от того, в каком гене появилась «опечатка» — в доминирующем или рецессивном (скрытом, отступающем). У доминирующего гена связанный с ним признак сказывается на потомстве, даже если такой ген

содержится в зародышевой клетке только одного из родителей. Действие рецессивного гена проявляется в новом поколении лишь при условии его присутствия в клетках обоих родителей. Выходит, что признак, связанный с рецессивным геном, может ждать своего часа на протяжении нескольких поколений, пока не произойдет слияние половых клеток, содержащих одинаковые гены.

Большинство мутаций рецессивно. И все же встречаются доминирующие мутации, проявляющиеся своими признаками в ближайшем поколении. Обычно новые признаки «вредны» для животных и растений: они понижают их стойкость в борьбе за существование. Лишь в редких счастливых случаях возникают «полезные» признаки. Ослабленные организмы с «вредными» признаками вымирают, а организмы с «полезными» признаками дают стойкие поколения.

Впервые мутации под действием рентгеновских лучей (а природа этих лучей такая же, как и ядерных гамма-квантов: то и другое — жесткое электромагнитное излучение) наблюдал в 20-х годах американский генетик Меллер. Объектом его опытов была знаменитая фруктовая мушка дрозофила. Меллер заметил, что при облучении насекомых рентгеновскими лучами скорость мутаций значительно возрастает. Позднее появление мутаций под воздействием ядерных излучений было обнаружено у многих животных и растений. У нас в стране блестящую работу в этом направлении проделал Борис Львович Астауров, добившийся увеличения «урожайности» коконов шелкопряда. Подобные работы позволили понять механизм лучевой болезни еще до хиросимской трагедии, после которой мировая общественность во весь голос заговорила об опасности ядерных излучений.

В опытах с различными видами животных и растений ученые установили, что возрастание скорости появления мутаций пропорционально энергии ядерного излучения, поглощенного половыми клетками родителей за период от начала их развития до зачатия потомства. В принципе любое, даже самое малое, количество поглощенного организмом излучения увеличивает скорость появления мутаций. Установлено, что мутации происходят, например, под влиянием естественного радиоактивного фона, созданного солнечной радиацией и космическими лучами. Жесткое электромагнитное излучение и

быстрые элементарные частицы, космические лучи, постоянно пронизывают атмосферу, в которой под действием первичных космических частиц рождаются и гамма-кванты и нейтроны. Все живое на Земле подвергается непрерывной космической «бомбардировке». Интенсивность ее возрастает по мере приближения к магнитным полюсам и с увеличением высоты над уровнем моря. Заметные количества радия, урана, тория, радиоактивного калия-40 содержатся в большинстве земных минералов и служат дополнительным источником облучения. В атмосфере есть также радон, радиоактивный газ — продукт распада урана. Более того, в самих организмах животных и растений содержится радиоуглерод и радиоактивный калий. В теле человека среднего веса в минуту происходит около 200 тысяч распадов радиоуглерода и свыше миллиона распадов калия-40. Калий-40 испускает энергичные бета-частицы, вылет которых из ядра сопровождается излучением гамма-квантов. Подсчеты показывают, что в среднем за всю жизнь человек получает 0,15 рентген (единица измерения радиации) естественного облучения. Таким образом, на протяжении всей своей истории человечество подвергалось радиоактивному облучению, и это не привело к каким-либо отрицательным последствиям. По-видимому, наоборот, слабые дозы облучения способствовали развитию жизненных форм на Земле.

По современным подсчетам, полная доза облучения половых желез человека, необходимая для удвоения скорости мутаций, равна в среднем 50 рентгенам. Однако удвоение скорости мутаций для человека совсем не благо. Дело в том, что увеличение частоты мутаций при возрастании интенсивности облучения повело бы к немедленному появлению большого числа изменений в наследственности, последствия которых были бы самыми ужасными. Ведь, как уже отмечалось, «полезные» мутации случаются крайне редко. Вот почему ныне, когда радиоактивные излучения и радиоактивные вещества стали широко применяться в науке и производстве, возникла необходимость в установлении максимально допустимой дозы облучения. В ее определении ученые исходят из признания естественного радиоактивного фона в качестве оптимального условия, обеспечивающего нормальную частоту мутаций и, стало быть, эволюцию человечества.



Отсюда вывод: максимально допустимая доза облучения человека, работающего с радиоактивными веществами, не должна приводить к резкому увеличению скорости мутаций. Надо, чтобы эта скорость мало отличалась от естественной.

Иное дело — применение радиоактивного излучения с экспериментальными целями в животноводстве и растениеводстве. Селекционеры издавна улучшали породы скота и сорта культурных растений, отбирая из поколения в поколение произвольно возникающие виды с благоприятными для сельского хозяйства признаками или получая эти признаки путем скрещивания. Радиоактивное облучение и применение других мутагенных факторов позволяют ускорить процесс выведения новых пород животных и новых сортов растений. По желанию человека скорость мутаций может быть увеличена во много раз. Конечно, при этом появится множество «вредных», отрицательных признаков. Однако среди них немало найдется и таких, какими селекционер будет удовлетворен. Ненужные селекционеру или ослабленные виды выбывают из «игры». Дальнейшие опыты ведутся с «удачными» экземплярами, у которых появились ценные свойства.

В Советском Союзе широко ведутся работы, цель которых — выведение высокопродуктивных сортов полезных растений. Радиоактивным кобальтом-60, который испускает гамма-кванты с высокой энергией, облучаются растения или их семена. Таким методом уже получены скороспелые и урожайные зерновые культуры, сорта овса, стойкого к грибковым заболеваниям. Выращены земляные орехи, отличающиеся устойчивостью к болезням и позволяющие механизировать труд по их выращиванию.

Можно сказать, что использование ускорения мутаций с помощью радиоактивного облучения особенно перспективно для выведения болезнестойких сортов растений. А эта задача очень актуальна. Потери урожая из-за болезней растений во всем мире весьма ощутительны.

Нет сомнения в том, что применение ядерной энергии в сельском хозяйстве позволит решить кардинальную проблему настоящего и будущего — проблему изобилия продуктов питания для всего человечества.





## НОВЫЕ СРЕДСТВА БОРЬБЫ С НАСЕКОМЫМИ

В девятой пятилетке Директивами XXIV съезда КПСС предусматривается увеличение производства и применения биологических средств защиты растений.

На земле существует несколько миллионов видов насекомых. Многие из них полезны для человека. Например, пчелы.

Известна удивительная история, когда в Австралию завезли экзотические для континента растения — кактусы. Завезли без особой нужды, хотя, впрочем, австралийские фермеры и надеялись использовать кактусы для живых изгородей. Кактусы бурно разрослись на новой родине и стали настоящим бедствием Австралии. Их вырубали, заливали асфальтом, но ничто не помогало. Победить зеленого врага удалось с помощью бабочки, привезенной с родины кактусов.

Кроме друзей, среди насекомых часто встречаются и враги человека. В 1929 году на юге нашей страны появились большие массы гусениц лугового мотылька. Их серо-зеленые скопления занимали огромную площадь. Сельскому хозяйству был нанесен громадный ущерб.

Вплоть до начала двадцатых годов нашего века перелетная саранча уничтожала посевы на больших площадях южных областей Советского Союза. Саранча размножалась в низовьях южных рек и громадными стаями вылетала на посевы. Благодаря применению ядохимикатов — инсектицидов — в наши дни нет опасности нашествия саранчи. В местах ее размножения авиация сбрасывает ядовитые вещества, такие, как гексохлоран, и ее личинки погибают. Но в африканских странах и по сей день саранча опустошает целые области. В огромных районах Африки муха це-це угрожает жизни людей и

животных. Во многих местах на Земле свирепствует малярия, разносимая малярийным комаром.

Вредные насекомые причиняли и причиняют человеку неисчислимые бедствия. Записи о произведенных ими опустошениях сохранились в рукописях, относящихся ко времени изобретения письменности. И в наши дни насекомые наносят тяжелые потери, поражают болезнями домашний скот, полезных диких животных и растения. Почти 50 миллионов человек можно было бы прокормить зерном, которое уничтожается вредителями только на одном Африканском континенте. Подсчитано, что около 20% продуктов питания, производимых во всем мире, приводят в негодность вредные насекомые.

Человек уже многие столетия борется с этим бесчисленным врагом, но избавиться от него полностью еще не смог. Сейчас война с насекомыми ведется и с помощью химических средств и более тонкими биологическими методами.

Пока основное средство борьбы с насекомыми — инсектициды — вещества, убивающие химическим действием либо самих насекомых, либо их потомство. Однако ядохимикаты уничтожают зачастую не только вредных, но и полезных насекомых. Они действуют на птиц, домашних животных.

Уже несколько десятилетий применяется препарат ДДТ. Его распыливают в садах, заселенных розовой гусеницей плодовой жоржкой. ДДТ распыляют и на пшеничных полях, зараженных вредителями.

На протяжении многих лет этот ядохимикат считался безвредным для людей и животных. Но тщательные опыты показали другое. Некоторое время ДДТ подмешивали в небольших количествах в пищу кошке. Животное оставалось совершенно здоровым. Наконец появились котята и начали сосать материнское молоко. Вскоре они погибли. Оказалось, что инсектициды накапливаются в организме, и в молоке кошки была уже опасная доза ДДТ.

Кроме того, некоторые насекомые приспособляются к инсектицидам, становятся к ним невосприимчивыми, у них вырабатывается своеобразный иммунитет. Поэтому прежде чем применять химическое оружие против насекомых, приходится тщательно изучить их самих.

Без изучения жизни насекомых ни химическое, ни лю-

бое другое оружие не будет действенным. И вот это необходимое знание ученые все чаще добывают с помощью ядерных излучений.

Представьте себе, что ученый должен изучить образ жизни точильщика, обитающего в стволах деревьев. Как это сделать, не разрушая среду обитания точильщика, не вмешиваясь в его жизнь? Для этого можно нанести на тело жука метку из радиоактивного кобальта и с помощью детектора гамма-лучей проследить движение насекомого по ходам, сделанным им в древесном стволе.

Радиоактивные метки позволяют надежно определять количество насекомых, заселяющих определенные площади; если насекомых пометить радиоактивным фосфором, то можно определить и расстояния, на которые они перемещаются за время жизни.

Установлено, что радиоактивные метки не изменяют подвижности и других физиологических особенностей насекомого.

Одна миллионная грамма радиоактивного кобальта-60 испускает 60 миллионов гамма-квантов в секунду — число, достаточное, чтобы счетчик обнаружил насекомое на значительном расстоянии. Поэтому, чтобы пометить особь, достаточно наклеить микроскопический кусочек кобальта к ее телу, добавить микроколичества радиоактивного изотопа в окружающую среду или корм — словом, способ применения радиоактивных меток выбирается в зависимости от целей эксперимента.

Ядерные излучения могут быть с успехом направлены не только на получение разведывательных данных, нужных в дальнейшем для правильного применения инсектицидов. С помощью радиации, используя биологические методы, можно уничтожать вредных насекомых, не причиняя ущерба полезным.

На юго-востоке США еще пятнадцать лет назад обитал враг крупного рогатого скота — мясная муха. Она откладывает свои личинки в свежие ранки. Развиваясь в теле животного, личинки губят его. Даже если принять все возможные меры для лечения, зараженный личинками скот, как правило, погибает. Борьба с этой мухой с помощью химических отравляющих веществ трудно — не посыпать же ядохимикатами поголовно шкуры животных.

На помощь пришла энергия атомного ядра. Была построена специальная «мушиная» фабрика. На ней разводили несколько миллионов особей в неделю и подвергали их облучению радиоактивными изотопами. Оказалось, что самец, облученный определенной дозой радиации, не может дать потомства, ни в чем остальном не изменившись. После радиоактивного облучения мух выпускали с самолетов над пораженными районами. Численность выпущенных самцов выбиралась из такого расчета, чтобы стерилизованных насекомых приходилось на единицу площади в несколько раз больше, чем обычных. Высадка мушиных десантов производилась в течение жизни нескольких поколений мясной мухи. Самки мясной мухи гораздо чаще спаривались и не давали потомства. Враг животноводов полностью исчез с пастбищ. Затраты на проведение эксперимента окупились за один год.

Ученые стремятся распространить накопленный опыт для борьбы и с другими видами насекомых. Один из них — похожая на домашнюю фруктовая муха — опасный вредитель садовых культур. Ее родина — средиземноморское побережье, но за последние десятилетия она распространилась по всему миру. Известно, что стерильные самцы фруктовой мухи эффективное средство борьбы с ней. Если ее и не удастся уничтожить полностью, то, во всяком случае, численность вредителя можно ограничить в сильной степени.

Ученые построили фабрику для разведения фруктовых мух. Здесь их облучают и выпускают в сады, на поля опытных участков.

Конечно, применение нового метода борьбы с вредителями в масштабах, удовлетворяющих народное хозяйство, оправдывается лишь в том случае, если затраты на разведение вредителей, их облучение и транспортировку окупают себя увеличением урожая или поголовья скота. Так, процесс уничтожения мясной мухи оказался экономически выгодным. Разведение же ее фруктовой сестры обходится гораздо дороже. Ученым приходится думать и об экономических проблемах.

Способ стерильных самцов пригоден и для уничтожения всем известной яблочной плодожорки. Небольшая, невзрачная бабочка наносит большой вред. Кроме яблок, она повреждает сливы и многие другие фруктовые деревья. Плодожорку уничтожали большим количеством

ядохимикатов. Но тогда наступают другие беды: гибнут от попавших в землю инсектицидов дождевые черви, снижается плодородность почвы, убывает численность полезных насекомых. Поэтому при определенных условиях, прежде всего с учетом экономической выгоды, предпочтительнее биологические методы борьбы с применением радиоактивных изотопов.

Радиоактивные методы — ключ к совершенствованию и основного пока оружия борьбы с насекомыми — инсектицидов.

Прежде всего необходимо следить за динамикой их распространения в среде, в которой живут насекомые, и в их организме. Изготавливают инсектициды, в молекулах которых один из атомов заменен радиоактивным. Радиоактивный атом в сложной молекуле никак не сказывается на химических свойствах (напомним — химические свойства вещества полностью определяются строением электронных оболочек молекул). Зато радиоактивную молекулу легко обнаружить: ведь при распаде ядра радиоактивного атома освобождается энергия, равная энергии превращений сотен тысяч атомов на «химическом» уровне.

Счетчик радиоактивного излучения регистрирует микроскопические количества радиоактивных инсектицидов, буквально отдельные молекулы. Не требуется и химического выделения из исследуемого препарата.

Инсектициды — сложные органические соединения. Под воздействием внешней среды и в других условиях они изменяют свои свойства. Некоторые из них становятся безвредными для насекомых, а другие, наоборот, более ядовитыми и опасными даже для человека. С помощью радиоактивных метчиков ученые и изучают такие процессы. Радиоактивные вещества полезны и при поисках инсектицидов, которые действуют избирательно только на один определенный вид насекомых и не заражают растений и животных, употребляемых человеком.

Меченные радиоактивными изотопами вещества помогут изучать процессы, скрытые в телах насекомых. По распространению радиоактивности можно наблюдать изменения в организмах малярийного комара и мельчайших mosquitos. С помощью радиоизотопов удалось даже выяснить природу гормонов, регулирующих развитие малярийного комара. Понимание таких тонких процессов

открывает и новые пути борьбы с насекомыми паразитами.

В некоторых случаях радиоактивными излучениями прямо уничтожают вредных насекомых. Громадное количество зерна гибнет в хранилищах. Если мешки с зерном или иную тару, наполненную зерновыми, облучить энергичными гамма-квантами, возникающими при распаде, скажем, осколков деления атомных ядер, то гамма-лучи свободно проникнут на большую глубину и поразят затаившихся в зернах вредителей и их личинки. В облученном зерне гибнут все насекомые.

Для радиационной обработки зерна создают специальные установки. В бетонную камеру загружают мешки с зерном. Внутри камеры в надежной оболочке помещают изотопы, испускающие мощный поток гамма-квантов. Доза облучения выбирается такой, чтобы пищевые качества продуктов не менялись, а вредители полностью погибали.

Иногда специалистам задают вопрос, а не станет ли зерно само радиоактивным под действием облучения? Лишь гамма-кванты очень высокой энергии могут «перемешать» нуклоны в ядре и породить опасные для человека радиоактивные изотопы. Поэтому физики подбирают изотопы, которые не излучают энергичных квантов, и активация в процессе облучения пищевых продуктов не происходит.

\* \* \*

У инженеров-исследователей есть два привычных им понятия «НИР» и «ОКР». Расшифровывается это так: научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские работы.

В «НИР» обычно ставится задача отыскать принципиально новые пункты решения научной или технической задачи.

В «ОКР» другая цель — создать уже на известных научных основах машины, приборы, новые транспортные средства, источники энергии.

Наши пестрые рассказы посвящены скорее «окрам», чем «нирам» ядерной физики, — тому, что уже внедрено или внедряется в жизнь.

Пройдут годы, и энергия атомных ядер будет поставлена в огромных масштабах на службу людям коммуни-

стического общества. Искусственные ядра будут сгорать и в атомных электростанциях и распадаться в сердце-протезе больного. По ядерным часам ученые восстаноят цепь исторических событий, протекавших в далекие эпохи, геохронология взойдет на новую ступень. Многие слова, которые читатель, быть может, впервые встретил в этой книжке, станут повседневными и привычными.

Наука продолжает свой стремительный бег. Появляются новые фундаментальные истины. На их основе возникнут и новые способы освождения энергии, удерживаемой веществом, совершенные методы измерений, анализа, управления.





## СОДЕРЖАНИЕ

ВОЗРОЖДЕНИЕ ЯДЕРНЫХ БРОН- ГОЗАВРОВ . . . . .	5
ЭНЕРГИЯ МИРА . . . . .	23
АТОМНЫЙ КОТЕЛ . . . . .	30
ЯДЕРНЫЙ КОМПЛЕКС . . . . .	34
УГЛЕРОДНАЯ ПАМЯТЬ . . . . .	43
ЯДЕРНОЕ ВРЕМЯ . . . . .	51
ЯДЕРНЫЕ ПРИБОРЫ . . . . .	59
ИЗЛУЧЕНИЯ И НАСЛЕДСТВЕН- НОСТЬ . . . . .	67
НОВЫЕ СРЕДСТВА БОРЬБЫ С НАСЕКОМЫМИ . . . . .	72

**Владислав Иванович Кузнецов**

## СОКРОВИЩНИЦА ХХІ ВЕКА

Редактор *Н. Яснопольский*

Художник *А. Алексеев*

Художественный редактор *Т. Добровольнова*

Технический редактор *Т. Пичугина*

Корректор *С. Ткаченко*

Т15213. Сдано в набор 12. V 1972 г. Подписано к печати 17. X 1972 г. Формат бумаги 84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. Бумага типографская № 3. Бум. л. 1,25. Печ. л. 2,5. Условн. печ. л. 4,20. Уч.-изд. л. 4,11. Тираж 85 000 экз. Издательство «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 1131. Набрано в типографии Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 12 коп. Отпечатано с матриц типографии Всесоюзного общества «Знание» в типографии № 2 ордена Ленина комбината печати издательства «Радянська Україна». Киев. Анри Барбюса, 51/2. Зак. 1473.