

Л.В. Матвеев

Почти всё о ядерном реакторе

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 53
ББК 22.3
Л11

Л11 **Л.В. Матвеев**
Почти всё о ядерном реакторе / Л.В. Матвеев – М.: Книга по Требованию, 2023. – 240 с.

ISBN 978-5-458-35359-5

Рассмотрены принципы работы ядерных реакторов и физические эффекты, затрудняющие их нормальную эксплуатацию. Анализируются дозовые характеристики излучения и облучения персонала АЭС и населения. Рассмотрены аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США) и Чернобыльской (СССР). Для широкого круга читателей, интересующихся ядерной энергетикой и ее проблемами. Может быть полезна для профессиональной ориентации школьников.

ISBN 978-5-458-35359-5

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

тора в нормальном режиме работы АЭС. Сначала описываются виды излучения, возникающие в ядерном реакторе, затем рассказывается о накоплении продуктов деления и определяется их активность. Результаты иллюстрируются данными, полученными при эксплуатации реальных энергетических реакторов. Фактическими данными иллюстрируется также накопление актиноидов. Рассматриваются активная зона ядерного реактора и технологические контуры АЭС как источники излучения. Описывается излучение остановленного реактора. В заключение главы приводятся допустимые дозы облучения персонала АЭС и населения.

Глава 6 посвящена описанию ядерного топливного цикла: ясно, что облучение топлива в ядерном реакторе — лишь один из переделов общего топливного цикла и без описания последнего картина общей активности, выделяющейся при использовании ядерной энергии, была бы неполной. Подробно описывается радиационная обстановка на всех этапах топливного цикла.

И, наконец, в гл. 7 рассматривается комплекс вопросов, связанных с предотвращением аварий ядерных реакторов. Обсуждается правомерность вероятностного подхода к оценке возможности возникновения аварий ядерных реакторов. Подробно описываются возникновение, развитие и последствия аварий ядерных реакторов на АЭС «Три-Майл-Айленд (США)» и Чернобыльской (СССР). Приводится сопоставление последствий от взрыва атомной бомбы и от полного разрушения типичного энергетического ядерного реактора.

Резюмируя, следует подчеркнуть, что в книге рассмотрен широкий круг вопросов, связанных с образованием ионизирующего излучения в ядерном реакторе как в нормальных, так и в аварийных режимах последнего. Авторы стремились к максимальной элементарности изложения: математические формулы практически отсутствуют, но зато приводится большое количество качественных физических рассуждений.

Главы 1 (кроме §1.3), 2, 3 и 7 написаны А. П. Рудиком, главы 4—6 и §1.3 — Л. В. Матвеевым.

Авторы выражают искреннюю благодарность профессору В. В. Хромову, взявшему на себя труд ознакомиться с рукописью, за интересные замечания, а один из авторов (А. П. Рудик), глубоко признателен Е. К. Кандрор за помощь при работе над корректурой.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с установившейся методологической традицией следовало бы начать изложение с обсуждения естественного вопроса: «А зачем вообще нужна ядерная энергетика, что она может дать, кроме неприятностей?» Однако авторы отказались от подобной схемы подачи материала и отложили ответ на этот вопрос до заключения, где он более обоснован. Сделано это было по следующим причинам. Во-первых, общее обсуждение связанных с этим вопросом проблем без детального анализа физики ядерных реакторов широко отражено в литературе. Поэтому лишнее повторение вряд ли произвело впечатление на кого бы то ни было. Во-вторых, книга писалась летом 1987 г., когда газеты и журналы были переполнены эмоционально-публицистическими статьями с обсуждением аварии на Чернобыльской АЭС (поток этих крайне нужных статей не уменьшился и к концу 1989 г.). Очевидно, что на этом фоне обсуждение общих проблем ядерной энергетике рационально проводить на глубокой основе физики ядерных реакторов. По существу данная книга и должна дать базу для подобного обсуждения, и авторы надеются в дальнейшем вернуться к этой проблеме.

А начать авторы решили с беглого изложения наиболее общих проблем физики Вселенной. Сделано это исходя из следующих соображений. Ядерные реакторы — как часть практического использования ядерной энергии человечеством — создали прецедент качественно нового взаимодействия человечества с природой. Ядерные реакторы работают по совершенно другим законам, чем агрегаты и устройства, нас непосредственно окружающие. И нам хотелось чуть-чуть приоткрыть для читателя дверь в этот необычайный мир, чтобы читатель хотя бы слегка почувствовал, что разговор идет об овладении совершенно новыми закономерностями. И за использованием ядерной энергии в широком смысле (от медицины через ядерную энергетiku до атомных и водородных бомб) последовало использование лазеров (опять же от медицины до СОИ), а на пороге — использование высокотемпературной сверхпроводимости (от чего и до чего?).

После этого короткого введения, навеянного замечаниями рецензента, перейдем к делу.

ЭНЕРГИЯ, ВЕЩЕСТВО, ИЗЛУЧЕНИЕ

1.1. ВСЕЛЕННАЯ НАЧАЛАСЬ С «БОЛЬШОГО ВЗРЫВА»

Начнем с выяснения вопроса, что такое энергия? На первый взгляд, здесь никакого вопроса-то нет. Каждый еще со школьной скамьи знает (и это правильное знание), «энергия — это способность производить работу». Это определение стало привычным и вошло в обыденную жизнь. Говорят о человеке: «Это энергичный человек», и подразумевают при этом, что человек деятельный, способный «провернуть» большую работу.

Но подобная простота в обращении с понятием «энергия» на самом деле обманчива. Энергия — это одно из основополагающих понятий, поэтому оно не может быть разъяснено с помощью других, более простых, а может быть лишь заменено не менее основополагающим понятием, что выше и делается: вместо понятия «энергия» вводится не менее основополагающее понятие «работа». Но ведь можно задать и вопрос: «А что такое работа?». И опять же на этот вопрос следует правильный, известный со школьных лет ответ: «Работа — это произведение (скалярное) силы на путь». (Термин «скалярное» поставлен в скобки, чтобы не отвлекать читателя от главной мысли определения, а означает он, конечно, что берется произведение проекции силы на перемещение.) И опять: вместо основополагающего определения «работа» введено не менее основополагающее определение «сила». Подобную замену одного термина другим можно продолжать и дальше. Но в конечном счете опять же дело сведется к некоторому термину, который должен быть принят за основу.

Аналогичная ситуация, конечно, имеет место и в самой «высокой» науке. Рассмотрим, например, наиболее простой случай из области механики. Понятие энергии объясняется следующим образом. Пусть имеется механическая система, состояние которой определяется $2s$

величинами q_i и \dot{q}_i ($i=1, 2, \dots, s$). Величины q_i и \dot{q}_i изменяются со временем. Отказываясь от чрезмерной общности, можно сказать, что механическая система состоит из s частиц, а q_i и \dot{q}_i — координаты и скорости этих частиц соответственно. Изменение q и \dot{q}_i со временем определяется соответствующей системой уравнений, которая получается на основе общего принципа, называемого *принципом наименьшего действия*. Конкретный вид этой системы, конечно, определяется видом взаимодействия частиц. Но оказывается, что при самом общем виде взаимодействия частиц существуют некоторые функции переменных q_i и \dot{q}_i , которые остаются постоянными во времени. Подобные функции называются *интегралами движения*. Интегралы движения определяются только начальными условиями. Разные интегралы движения играют разную роль в механике. Некоторые из них носят довольно случайный характер. Но есть и такие, которые имеют очень глубокое происхождение, связанное с основными свойствами пространства и времени, а именно с изотропией и однородностью. Интеграл движения, связанный с однородностью времени, и называется *энергией*. Интеграл движения, связанный с изотропией пространства, называется *импульсом*.

Таким образом, в рассмотренном примере механической системы понятие «энергия» выводится из таких основных понятий, как время, его однородность, и постулируемого принципа наименьшего действия.

Конечно, и в практической жизни, и в инженерной практике нам не нужны такие глубокие понятия энергии, которые были проиллюстрированы на основе механической системы. Но что крайне важно — это закон сохранения энергии. Энергия не возникает и не уничтожается. Энергия только переходит из одной формы в другую. Но поскольку энергия обуславливает возможность существования работы в реальном мире, работы, результаты которой необходимы для развития человеческой цивилизации, то представляет несомненный интерес вопрос, как во Вселенной была «накоплена» энергия.

По сути дела вопрос сводится к проблеме сотворения мира, имеющей длинную историю. На самой заре развития человечества ответ давался чисто в мифологическом плане. Потом, когда мифология породила религию и философию (а последняя, в свою очередь, привела

к возникновению различных конкретных наук), вопрос о сотворении мира находился в компетенции религии и опять же решался в мифологическом плане: Бог сотворил мир, Адама, Еву и т. д. Значительно позднее этот вопрос пыталась разрешить материалистическая философия: еще каких-нибудь сорок лет тому назад у каждого клуба висели непрестанно афиши: «Лекция — было ли начало и будет ли конец мира? Лектор — член Общества распространения знаний имярек». Правда, основная направленность подобных лекций была чисто антирелигиозная: «Бога нет!». Что же касается непосредственно вопроса о начале и конце мира, то ответ был однозначный: «Начала и конца у мира нет потому, что не может быть никогда!».

Какова ситуация с этим вопросом на сегодняшний день? Строго доказано, что начало Вселенной было — возраст Вселенной что-то около 10—20 млрд. лет. В какой степени это утверждение справедливо? Как всякое научное утверждение, оно должно удовлетворять по крайней мере двум основным требованиям. Во-первых, должна быть оговорена точность тех предпосылок, в которых данное утверждение получено, и, во-вторых, должны быть указаны следствия из делаемого утверждения, которые обязательно могут быть проверены экспериментальным путем.

Утверждение о том, что существовало начало Вселенной, делается на основе *общей теории относительности*. Как любая другая теория о протекающих в природе явлениях, данная теория является приближенной, т. е. существуют такие пространственно-временные области, в которых она очень хорошо описывает явления (но, конечно, не абсолютно точно), и есть области, в которых она просто неправильна. Для иллюстрации этой мысли приведем простой пример. Известно, что механика Ньютона справедлива при скоростях движения тел, много меньших скорости света. Поэтому, например, эта механика хорошо описывает движение автомобилей. Но она непригодна для описания поведения элементарных частиц, движущихся со скоростями, близкими к скорости света. Кроме того, и в случае с автомобилем ответ, даваемый механикой Ньютона, верен с определенной точностью, он не является абсолютно строгим — погрешность имеет значение порядка квадрата отношения скорости автомобиля к скорости света. И поэтому, если перейти от автомоби-

ля к самолету, летящему со скоростью, превышающей скорость звука, и заставить этот самолет облететь вокруг Земли, то при современных методах измерения времени уже можно экспериментально определить отклонение от механики Ньютона, что и было сделано.

Но вернемся к вопросу об эволюции Вселенной. Итак, у нее было начало. Время существования Вселенной определяется из общей теории относительности. Отвлекаясь от неопределенностей во входных данных, следует подчеркнуть, что сама по себе общая теория относительности также является приближенной теорией. Но границы ее применимости определяются не требованием релятивистичности (т. е. требованиями конечности скорости распространения света), как это было в механике Ньютона (общая теория относительности — релятивистская теория), а квантования: при малых временах нельзя пользоваться классической теорией, какой является общая теория относительности. Установлено, что квантовые поправки начинают сказываться при временах, меньших 10^{-44} с, т. е. при ничтожно малых временах. Поэтому надо полагать, что для процессов, протекавших даже в относительно малые доли секунды с момента возникновения Вселенной, эти поправки будут совершенно несущественны.

Как же нам представляется сейчас, что было в первые мгновения возникновения Вселенной? Был взрыв, непохожий на обычные, который имеет даже специальное название *большой взрыв*. В обычных взрывах в некотором месте пространства очень быстро выделяется энергия, которая затем распространяется от места взрыва в другие области пространства. В большом взрыве дело обстоит иначе: здесь энергия выделилась в *каждой* точке пространства, и *все* точки пространства стали удаляться друг от друга.

Трудно удержаться, чтобы не подчеркнуть, что общая теория относительности по своему внутреннему содержанию является далеко не тривиальной, привычной при оценке с обыденных позиций теорией. В ней имеется глубокая связь метрики пространство — время с энергией. Поэтому интересно, как в рамках большого взрыва отвечают на вопрос: «А что было до большого взрыва?» Оказывается, что понятие «что было до» требует введения времени, а так как и время, и пространство вместе с энергией возникли в момент большого взрыва, то в этом случае вопрос «что было до» и поставлен быть не может.

Чем же было заполнено пространство Вселенной в первые мгновения? (Для упрощения предположим, что от начала Вселенной прошло около 0,01 с, картина при меньших временах существенно сложнее.) В это время температура составляла около 10^{11} К, за счет расширения она все время падала, и Вселенная состояла из излучения и вещества, главным образом фотонов, электронов, позитронов, нейтрино и антинейтрино. Электрон и позитрон — это частица и античастица (так же как нейтрино и антинейтрино); аннигилируя, они превращаются в фотоны. Аналогично фотоны могут родить пару электрон — позитрон. Температура была настолько велика, что рождение и аннигиляция пар шли непрерывно. Плотность вещества была огромна — $3,8 \cdot 10^9$ г/см³. Поэтому даже нейтрино — частица, обладающая только слабым взаимодействием и поэтому практически свободно проходящая сквозь Землю, — находилось в тепловом равновесии с фотонами, электронами и позитронами.

Но самое важное для нас, что среди этих веществ находились и нейтроны, и протоны — частицы, из которых теперь состоят ядра нуклидов. Их было существенно (примерно в 10^9 раз) меньше, чем электронов и фотонов. Строго говоря, почему были нейтроны и протоны, не очень ясно — их присутствие приходится постулировать. Важно, что вследствие очень большой температуры среды непрерывно шли реакции взаимного превращения нейтронов в протоны и обратно: нейтрон, захватывая нейтрино, превращался в протон и электрон (обратная этой реакции: протон, захватывая электрон, превращался в нейтрон и нейтрино), и нейтрон, захватывая позитрон, превращался в протон и антинейтрино (соответственно обратная реакция: протон, захватывая антинейтрино, превращается в нейтрон плюс позитрон). Поэтому число протонов и нейтронов было одинаково — это чрезвычайно важный момент, лежащий в основе объяснения происхождения нуклидов.

На последнем процессе мы вкратце остановимся ниже. Кстати, здесь уместо подчеркнуть, что приводимая картина развития Вселенной крайне упрощена (по данному вопросу существует огромная литература как для специалистов, так и для менее подготовленного читателя).

Возникнув, Вселенная стала очень быстро расширяться и остывать. В космогонии принято измерять ско-

рость расширения Вселенной в единицах *характерного времени расширения* (это время в 100 раз больше, чем время, требующееся на увеличение размеров Вселенной на один процент: в процессе эволюции Вселенной характерное время изменяется). В первые мгновения образования Вселенной характерное время было равно 0,02 с. Как уже указывалось выше, все имевшиеся тогда частицы находились в тепловом равновесии.

Всего лишь через 0,11 с (но это лишь мы воспринимаем как «всего лишь», а с точки зрения эволюции Вселенной это существенный промежуток времени) картина качественно изменилась: температура среды упала до $3 \cdot 10^{10}$ К, характерное время расширения увеличилось до 0,2 с (ибо гравитация замедляет расширение Вселенной). Состав Вселенной продолжал определяться электронами, позитронами, нейтрино, антинейтрино и фотонами, причем все эти частицы продолжали находиться в тепловом равновесии (температура была существенно выше температуры рождения пары электрон — позитрон). Число протонов и нейтронов продолжало оставаться относительно малым, они еще не были связаны в атомные ядра (температура среды слишком велика), но начала сказываться разница в массах протона и нейтрона: нейтрон тяжелее и ему легче превратиться в протон, чем протону в нейтрон. Поэтому процентное соотношение между нейтронами и протонами стало равным 38 : 62.

Следующий качественный момент — это примерно 1 с от начала возникновения Вселенной. К этому времени температура снизилась до 10^{10} К, соответственно упала и плотность среды, в результате чего нейтрино оказались уже свободными частицами, и в дальнейшей эволюции Вселенной роли не играли (интересно, конечно, для подтверждения в эксперименте развиваемой концепции эволюции Вселенной измерить сейчас реликтовый фон нейтрино, но так как нейтрино обладает лишь слабым взаимодействием, подобные эксперименты — пока что?! — не представляются возможными). Кроме того, происходили следующие явления: из-за падения температуры электрон-позитронные пары начали аннигилировать быстрее, чем рождаться из излучения, и нейтрон-протонное соотношение по той же причине стало равным 24 : 76. Атомные ядра по-прежнему существовать не могли.

Далее, существенным моментом является примерно 14 с от начала возникновения Вселенной: к этому времени температура настолько упала (до $3 \cdot 10^9$ К), что уже не могли рождаться электрон-позитронные пары из излучения. С этого момента «температура Вселенной» определялась как температура фотонов. Происходило образование ядер ${}^4\text{He}$ (ядро ${}^4\text{He}$ состоит из двух протонов и двух нейтронов). Тонкость этого процесса заключается в том, что ядро ${}^4\text{He}$ уже устойчиво при этой температуре, но его образование идет через ядро дейтерия (т. е. тяжелого водорода), содержащего один протон и один нейтрон. Энергия связи ядра дейтерия чрезвычайно мала, в силу чего оно легко распадается при температуре порядка $3 \cdot 10^9$ К. Этот эффект, в частности, препятствовал тому, чтобы образовывались ядра тяжелее ${}^4\text{He}$. Нейтронно-протонное соотношение к этому моменту стало равным 17 : 83.

Когда температура упала до 10^9 К, а произошло это примерно через 3 мин от начала возникновения Вселенной, ядра ${}^4\text{He}$ и трития (еще более тяжелого изотопа водорода, ядро которого состоит из одного протона и двух нейтронов, практически стабильного — время полураспада около 12,5 лет) уже могли существовать, практически не подвергаясь распаду. Электроны и позитроны исчезли и в основном Вселенная состояла из фотонов, нейтронов и антинейтрино [напомним, что количество протонов и нейтронов во Вселенной было ничтожно; кстати, к этому моменту начала сказываться нестабильность нейтрона (время жизни около 16 мин), что совместно с падением температуры привело к изменению нейтронно-протонного соотношения 14 : 86].

Далее наступил очень интересный момент: температура настолько упала, что стали удерживаться от развала ядра дейтерия. Казалось бы, имелись все условия для образования тяжелых ядер. Но фактически ядра тяжелее ${}^4\text{He}$ не образовывались, ибо не существует стабильных ядер с шестью или восемью ядерными частицами.

На этом закончилась первая стадия эволюции Вселенной. Потом в течение примерно миллиона лет ничего существенного не происходило (в смысле изменения состава Вселенной), но Вселенная продолжала расширяться и остывать. В конце первой стадии вещество, из ко-

того в дальнейшем образовывались звезды, состояло примерно из 25 % ${}^4\text{He}$ и 75 % водорода.

Спрашивается, имеются ли какие-нибудь наблюдательные факты (этот термин часто употребляется в астрофизике, поскольку там проводятся не эксперименты, в которых специально создаются нетривиальные условия, а лишь наблюдения), подтверждающие описываемую выше картину эволюции Вселенной, полученную на основе теоретических соображений?

Основным подтверждением существования большого взрыва, т. е. состояния Вселенной с очень высокой температурой, является обнаруженное около двух десятилетий тому назад микроволновое излучение. Это излучение имеет сейчас температуру порядка 3 К. Оно оказалось практически изотропным, а главное, его распределение по частотам полностью соответствует распределению, которое должно получиться в случае теплового равновесия. С учетом остывания за время эволюции Вселенной теперешняя температура излучения, равная 3 К, как раз соответствует тем колоссальным температурам, которые были в момент большого взрыва. В настоящее время интенсивность микроволнового излучения сравнима с яркостью охватывающего все небо Млечного Пути; за счет этого излучения отдельный индивид поглощает энергию примерно 10^{-5} Вт.

Более косвенные (в том смысле, что подобные выводы, по-видимому, могут получаться и в иных моделях, чем большой взрыв) данные, подтверждающие концепцию большого взрыва, основаны на соотношении водорода и ${}^4\text{He}$ во Вселенной в настоящее время. Это соотношение указывает на то, что в начальный момент времени не происходил синтез ядер тяжелых элементов. Кроме того, ${}^4\text{He}$ однородно распространен во Вселенной, что опять же подтверждает его образование на ранних стадиях развития Вселенной.

Вернемся к рассмотрению эволюции Вселенной после того, как основное вещество в ней, из которого образовались звезды, состояло из водорода и ${}^4\text{He}$. При дальнейшем расширении и охлаждении Вселенной стали образовываться звезды. За счет гравитационного взаимодействия звезды сжимались, и в них повышалась температура. Когда эта температура оказалась достаточно высокой, начался синтез более тяжелых элементов из водорода и гелия. Существенно при этом, что фотонный