

ФИЗИКА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
Серия основана в 2003 году

Научные редакторы:

д-р физ.-мат. наук, проф. Л.К. Мартинсон

д-р физ.-мат. наук, проф. А.Н. Морозов

Москва
Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
2015

В.С. Окунев

Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
«Ядерная физика и технологии»
в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений*

2-е издание, исправленное и дополненное



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н. Э. Баумана

2 0 1 5

УДК 539.1 + 621.039(075.8)

ББК 31.46

О-52

Рецензенты:

кафедра теоретической и экспериментальной физики
ядерных реакторов МИФИ, д-р физ.-мат. наук,
профессор Н.В. Щукин;
д-р техн. наук, профессор И.Х. Ганев;
канд. физ.-мат. наук И.Б. Лукасевич;
д-р техн. наук А.В. Лопаткин;
д-р техн. наук, профессор В.В. Перевезенцев

Окунев, В. С.

О-52 Основы прикладной ядерной физики и введение в физику ядерных реакторов : учебное пособие / В. С. Окунев. — 2-е изд., испр. и доп. — Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. — 534 [2], с. : ил. — (Физика в техническом университете / науч. ред. Л. К. Мартинсон, А. Н. Морозов).

ISBN 978-5-7038-3967-6

Приведен краткий обзор основных физических теорий, на основе которых строится теория ядерных реакторов. Физика ядерных реакторов изложена как прикладная ядерная физика низких энергий. Рассмотрены также ядерные силы и ядерные взаимодействия, свойства атомных ядер, основные виды радиоактивности, характеристики взаимодействия излучения с веществом. На понятном уровне изложены физические принципы работы ядерных реакторов деления, ядерных реакторов синтеза, подкритических систем, управляемых ускорителями.

Содержание учебного пособия соответствует курсам лекций, которые автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических вузов, приступающих к изучению курса физики ядерных реакторов, а также обучающихся по специальности «Ядерные реакторы и энергетические установки» и смежным специальностям.

УДК 539.1 + 621.039(075.8)

ББК 31.46

© Окунев В. С., 2010

© Окунев В. С., 2015, с изменениями

© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015

ISBN 978-5-7038-3967-6

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ

Выход первого издания учебного пособия, посвященного 180-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана и увидевшего свет в 2010 г., полностью оправдал надежды автора. Книга оказалась полезной для студентов, аспирантов и специалистов, работающих в области ядерных технологий. Относительно небольшой тираж пособия не удовлетворил спрос на него не только в МГТУ им. Н.Э. Баумана, но и в других вузах. Автор получил несколько доброжелательных отзывов, в том числе от преподавателей НИЯУ МИФИ, студентов других технических вузов. В октябре 2010 г. пособие вошло в состав экспозиции Издательства МГТУ им. Н.Э. Баумана на 62-й Международной книжной ярмарке во Франкфурте-на-Майне.

Во втором издании пособия полностью сохранена структура первого издания, исправлены неточности. Учитывая пожелания читателей, а также факт недавно произошедшей аварии сразу на четырех энергоблоках АЭС «Фукусима-1», автор счел необходимым дополнить книгу главой, посвященной физическим принципам реакторов естественной безопасности и отражающей современный взгляд на развитие ядерных источников энергии ближайшего будущего. Эта глава, содержащая исследования автора по обоснованию безопасности ядерных реакторов нового поколения, является логическим заключением книги и представляет собой материал части лекций по физико-математическому моделированию, которые автор читает студентам 6-го курса кафедры ядерных реакторов и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана. С материалом этой главы автор в течение нескольких лет знакомил аспирантов МГТУ им. Н.Э. Баумана, ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала», ОАО «ОКБ Гидропресс».

Содержание учебного пособия отвечает программам курсов по физике ядерных реакторов (гл. 1–9) и физико-математическому моделированию ядерных энергетических установок (гл. 10–16), разработанных в рамках образовательных стандартов нового поколения.

Выход в свет второго издания автор посвящает знаменательному для коллектива кафедры физики и всего МГТУ им. Н.Э. Баумана событию – открытию современного учебно-лабораторного комплекса – Дома Физики. Работа над книгой не была бы успешной без поддержки заведующего кафедрой физики МГТУ им. Н.Э. Баумана профессора А.Н. Морозова. Особую признательность автор выражает преподавателю Православного Свято-Тихоновского гуманитарного университета и Коломенской православной духовной семинарии священнику Петропавловского храма в Лыткарине А.С. Ионову, по благословлению которого велась работа над вторым изданием книги, за его духовную поддержку и полезные наставления.

ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ

Основу настоящего учебного пособия составляет часть курса лекций по физике ядерных реакторов, читаемого в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для полноты понимания материала в него включены небольшие разделы лекционных курсов по физико-математическому моделированию ядерных энергетических установок и установок ядерного топливного цикла, непосредственно связанных с физическими аспектами их работы и проблемой обеспечения топливом энергопроизводящих систем будущего, работа которых основана на трансмутации атомных ядер.

Пособие призвано с учетом специфики технического университета, связанной с углубленной конструкторско-технологической подготовкой студентов на базе общей и ядерной физики, а также физики реакторов, объединить два научных направления: фундаментальное — ядерная физика и прикладное — ядерные реакторы.

Физика ядерных реакторов представлена как приложение более фундаментального научного направления — ядерной физики.

Автор стремился оптимизировать структуру пособия, пропорционально изложить оба направления в форме, максимально доступной для студентов именно технического университета, где наряду с фундаментальными основами физики, востребованы и ее приложения к различным областям науки и техники, в данном случае — ядерным энергетическим установкам. Такой подход к изложению материала актуален при подготовке инженеров-физиков, ориентированных на решение прикладных технических задач.

В учебном пособии автор осветил вопросы, которые обычно задают студенты на лекциях и консультациях.

Вводная часть курса физики ядерных реакторов обеспечивает последовательный переход от общей физики, включая ядерную, к прикладной ядерной физике низких энергий — физике реакторов.

Учебное пособие разделено на три части. В первой части изложена современная физическая картина мира, вторая часть посвящена ядерной физике низких энергий, третья — физике реакторов. В главах, где представлены основы ядерной физики, содержится достаточно обширный материал, необходимый для понимания физики ядерных реакторов. Связующим звеном ядерной физики и физики реакторов служит нейтронная физика, которой посвящена отдельная глава.

Автор благодарен В.И. Солонину, заведующему кафедрой ядерных реакторов и установок МГТУ им. Н.Э. Баумана, за постоянное внимание, всестороннюю помощь и поддержку при подготовке настоящего издания.

Глубокую признательность автор выражает научным редакторам серии «Физика в техническом университете» — заведующему кафедрой физики МГТУ им. Н.Э. Баумана профессору А.Н. Морозову и профессору Л.К. Мартинсону за ряд ценных замечаний, поддержку и помощь в издании пособия. Автор благодарен рецензентам Н.В. Шукину, И.Б. Лукасевичу, И.Х. Ганеву, А.В. Лопаткину, В.В. Перевезенцеву.

ВВЕДЕНИЕ

Ядерный реактор — сложное техническое сооружение, работа которого основана на определенных технических решениях, технологиях, физических теориях и принципах. Технологии и инженерные решения могут различаться при изменении целей и задач, стоящих перед ядерной энергетикой на данном этапе развития. Они неодинаковы для реакторных установок разного назначения. Неизменны лишь физические законы и принципы, на которых основана работа реакторов. Главные из них — выделение колоссальной энергии при делении тяжелых ядер (или синтезе легких) и принципиальная возможность самоподдерживающейся цепной реакции деления. Инженерные решения позволили осуществить управляемую, т. е. контролируруемую во времени, самоподдерживающуюся реакцию деления в определенном (ограниченном) пространстве, называемом активной зоной. Развитие технологий способствует решению стоящих перед человечеством проблем (в первую очередь проблемы обеспечения энергией) с наибольшей эффективностью, т. е. с наименьшими экономическими затратами. И физические принципы, и технологии позволяют решать поставленные задачи при минимальном негативном воздействии на здоровье людей и окружающую среду. Прогресс в развитии ядерной энергетике и освоении новых практически неисчерпаемых источников энергии, в первую очередь управляемого термоядерного синтеза, основан на знаниях о фундаментальной структуре материи, на теориях, разработанных в первой половине XX столетия, многие из которых все еще не завершены.

Физические теории строятся на определенных постулатах. Они не являются безусловной истиной, но базируются на принципе соответствия, предполагающем, что теория, созданная на основе каких-либо гипотез, может в скором времени оказаться лишь частным случаем более общей теории.

Работа ядерного реактора связана с трансмутацией (превращением) ядер: с изменением баланса окружающих нас химических элементов и радиационного баланса, т. е. с воздействием на окружающую среду и необратимым преобразованием ее. Подобное воздействие далеко не всегда позитивно.

Как минимизировать негативное воздействие на окружающую среду, что делать с отработанным ядерным топливом (ОЯТ), содержащим высокоактивные нуклиды и долгоживущие отходы относительно низкой активности, как исключить тяжелые аварии на АЭС, защитить топливный цикл ядерной энергетики от возможного хищения материалов, которые могут быть использованы в военных целях, что делать с огромными запасами урана и плутония — далеко не полный перечень проблем, возникших на рубеже XX и XXI вв. Уникальность ядерной энергетики заключается в том, что, создавая проблемы, она может их решать на основе тех знаний, которые накоплены человеческой цивилизацией. Наибольших успехов можно достичь, отдавая приоритет не инженерным системам и устройствам, а так называемым внутренне присущим реактору естественным свойствам, основанным на законах природы. Природный ядерный реактор, работавший около двух миллиардов лет назад в Африке в режиме саморегулирования, — яркий пример возможности исключения инженерных систем безопасности.

Физика ядерных реакторов базируется на современных знаниях о фундаментальной структуре материи, физических теориях взаимодействия излучения с веществом, корпускулярно-волновом дуализме. Квантово-механические факторы в процессе взаимодействия нейтронов с ядрами играют существенную роль при энергиях нейтронов до 0,2 МэВ, т. е. в энергетическом диапазоне, характерном для ядерных реакторов деления (особенно на тепловых нейтронах), и являются определяющими для нейтронов низких энергий. Как правило, расчет реактора всегда проводится в предположении, что нейтрон — точечная частица. Однако вся теоретическая основа расчета нейтронных эффективных сечений является, по сути, приложением квантовой (волновой) механики. Процессы взаимодействия излучения с веществом, деления ядра, α -распад практически необъяснимы с позиций классической физики. Да и существование стабильных атомов невозможно обосновать с этих позиций. (В планетарной модели атома, предложенной Э. Резерфордом, электроны должны упасть на ядро за время $t \sim 10^{-8}$ с.) Поэтому автор счел целесообразным рассмотреть основные физические теории, на базе которых создавалась физика реакторов, необходимые для понимания нейтронно-физических процессов, протекающих в ядерном реакторе, тем более, что некоторые из этих теорий входят в стандарт специальности «Ядерные реакторы и энергетические установки».

Физические процессы, протекающие в ядерном реакторе, — это не только нейтронная и ядерная физика, но и теплофизика, химия, гидродинамика, физика прочности и многое другое. Однако, когда речь идет о физике реакторов, традиционно под этим подразумевается именно нейтронно-физический аспект проблемы, поскольку открытие и доказательство возможности осуществления самоподдерживающейся цепной реакции деления тяжелых ядер нейтронами дали право на жизнь и ядерным реакторам, и ядерной энергетике в целом. Все остальное — вопросы инженерно-технического характера. Они не менее важны, но вторичны. (Природный реактор в Окло обходился без них более полумиллиона лет — пока не выгорел ^{235}U .)

ЧАСТЬ I

СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА

«По современным представлениям вещество нашей Вселенной построено из фундаментальных частиц, число типов которых невелико и которые взаимодействуют между собой силами четырех видов. От частицы к частице силы передаются специальными носителями взаимодействия — калибровочными полями. Каждая из четырех разновидностей сил (фундаментальных взаимодействий) имеет свои особые свойства. <...> В последнее время все настойчивее высказывается предположение, что поля, передающие взаимодействие между частицами, принадлежат одному и тому же семейству. Идея о близком родстве калибровочных полей лежит в основе разрабатываемой сейчас теории объединения взаимодействий. Такова современная физическая картина мира» (Р. Утияма).

Согласно Стандартной модели физики элементарных частиц (далее — стандартная модель), сформулированной в 1970-е годы и подтвержденной опытным путем в начале 1980-х — середине 1990-х годов, все великолепие окружающего мира построено из фундаментальных частиц шести видов: электронов, *u*- и *d*-кварков, глюонов, фотонов и бозонов Хиггса. (Фундаментальными называют частицы, которые на современном уровне знаний являются неделимыми, т. е. не состоят из других частиц.) Ё. Намбу определил конечную цель физики элементарных частиц как выяснение структуры вещества и формулировку законов, управляющих его поведением.

К концу XX в. кардинально изменилось представление об устройстве Вселенной. Согласно современным знаниям о фундаментальных свойствах материи Вселенная на 25 % состоит из вещества (4 % — барионная материя, 21 % — темная материя) и на 75 % — из излучения. Существование темной материи требует расширения рамок стандартной модели.

Развитие физики в начале XX в. привело к полному пересмотру классических представлений о строении материи. В основе «новой физики» лежат две фундаментальные теории: специальная теория относительности и квантовая теория, на которых построено описание явлений микромира.

1. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МАТЕРИИ

1.1. Виды фундаментальных взаимодействий

В общем случае под взаимодействием в физике понимают воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения. По современным данным существует четыре вида фундаментальных взаимодействий. В порядке убывания интенсивности это сильное (и одно из его проявлений — ядерное) S , электромагнитное $E-M$, слабое (слабое ядерное) W и гравитационное G взаимодействия.

Четыре вида фундаментальных взаимодействий — следствие единого взаимодействия, которое по-разному проявляет себя при разных энергиях и расстояниях. В основе объединения взаимодействий лежит современное представление о симметриях. Высокие температуры стремятся восстановить симметрию, сделать систему более симметричной. Привычные представления о природе четырех видов взаимодействий возникли потому, что мы живем в мире относительно низких энергий.

Механизм взаимодействий — обмен частицами (причем каждому типу соответствуют свои частицы), т. е. это *обменные взаимодействия*. Все теории, описывающие взаимодействия, предполагают наличие поля (его называют *калибровочным*) и кванта, переносящего взаимодействие, поэтому их называют калибровочными теориями.

1.2. Микромир и фундаментальные составляющие материи

Производные и внесистемные единицы измерения в физике микромира. С 1963 г. В СССР в качестве предпочтительной, а в настоящее время в России в качестве обязательной используется Международная система единиц СИ, которая для механических единиц совпадает с системой МКС (метр, килограмм, секунда), а для электромагнитных — с МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер). Основные и дополнительные единицы СИ регламентированы государственными стандартами. Первый такой стандарт «Единицы

2. СИЛЬНОЕ (ЦВЕТНОЕ) ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

2.1. Общие положения

Сильное взаимодействие — наиболее интенсивное из всех видов фундаментальных взаимодействий. Существование сильного взаимодействия подтвердилось в 1930-е годы после открытия сложной структуры атомных ядер, состоящих из нуклонов. Эксперименты показали, что взаимодействие между нуклонами гораздо сильнее электромагнитного взаимодействия: средняя энергия связи нуклона в ядре — несколько мегаэлектронвольт, энергия связи атома в молекуле — несколько электронвольт.

В отличие от электромагнитного и гравитационного сильное взаимодействие обладает конечным радиусом действия. Соотношение квантовой механики $mcr \sim \hbar$ требовало постулирования существования тяжелых обменных частиц — переносчиков сильного взаимодействия. В 1935 г. Х. Юкава высказал предположение о существовании мезонов — переносчиков сильного взаимодействия. Теория Юкавы — теория ядерного взаимодействия, которое является проявлением сильного взаимодействия. Как выяснилось позднее, сильное взаимодействие более фундаментально и описывает связь между кварками, составляющими адроны, посредством обмена глюонами. Ядерное взаимодействие, обусловленное обменом пионами, имеет наибольший радиус действия ($r \approx 1,41$ фм) среди широкого спектра сильных взаимодействий $r \approx 0 \dots 1,41$ фм).

Радиус действия ядерных сил $r_S \sim 1$ фм. При сближении двух адронов на расстояние менее r_S их движение хаотизируется за счет сильного взаимодействия. Поэтому r_S выступает фактически в роли размера адрона.

2.2. Некоторые характеристики сильновзаимодействующих частиц

Барионный заряд. Различают два класса адронов: барионы и мезоны. Все барионы имеют сохраняющее значение барионного заряда), которого нет у мезонов (нулевой барионный заряд). Бари-

3. ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ

3.1. Ядерная материя

Ядерное взаимодействие как проявление сильного взаимодействия может быть описано в рамках *теории ядерной материи*. Это сравнительно молодое направление в физике. Под *ядерной материей* обычно понимают не ограниченную в пространстве систему нуклонов, находящихся в устойчивом состоянии по отношению к самопроизвольному расширению или сжатию. Теория ядерной материи — идеализация. Она сформулирована для бесконечного ядра с заданным отношением нейтронов и протонов N/Z , причем кулоновские силы, действующие между протонами, не учитывают. Теория базируется на двухнуклонном потенциале, т. е. использует двухчастичное приближение, основанное на парных взаимодействиях нуклонов.

Рассматривают симметричную ($N/Z = 1$) и несимметричную ($N/Z \neq 1$) ядерные материи. Наиболее детально разработана теория симметричной ядерной материи.

Частным случаем ядерной материи в природе можно считать нейтронную материю ($Z = 0$, $A = N$, где A — число нуклонов), согласно существующим представлениям составляющую основную часть нейтронных звезд.

Первые попытки построения теории ядерной материи относят к концу 1930-х годов. Расчетные исследования тогда основывались на потенциалах нуклон-нуклонного взаимодействия. Значительные успехи в теории достигнуты к концу 1950-х годов и принадлежат Р. Ястрову и К. Бракнеру.

Ключевой проблемой, определяющей практическую применимость теории ядерной материи, является возможность описания реальных конечных объектов. Теория хорошо описывает макрообъекты — космические тела, плотность которых близка к плотности атомных ядер (например, около 10^{14} г/см³ у нейтронных звезд); вещество в предельно сжатом состоянии и объекты микромира — тяжелые ядра (с большим числом нуклонов). Цель теории и ее прикладной характер заключаются в определении свойств реальных конечных ядер исходя из реалистически выбранного взаимодействия между нуклонами.

Теория ядерной материи в приложении к конечным объектам позволяет корректно описать свойства тяжелых ядер, их деление,

4. СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

4.1. Состав и структура атомных ядер

Основные определения. Состав ядра. *Ядро* — слабо связанная система нуклонов: чтобы удалить один нуклон из ядра, необходимо затратить энергию менее 10 МэВ, что намного меньше энергии покоя нуклона (около 1000 МэВ). Можно считать, что ядро состоит из нуклонов, движущихся с нерелятивистскими скоростями ($v^2/c^2 \leq 0,1$), и обладает такими же свойствами, как и свободные нуклоны. Атомные ядра представляют собой связанные квантовые системы фермионов. Свойства атомных ядер определяются совместным действием сильного, электромагнитного и слабого взаимодействий.

Ядро — центральная массивная часть атома, вокруг которой по квантовым орбитам обращаются электроны. Масса ядра более чем в 10^3 раз превышает массу входящих в состав атома электронов. Диаметр ядра приблизительно в 10^5 раз меньше диаметра всего атома. Концентрация нуклонов в ядре составляет около 10^{38} см⁻³, средняя энергия движения нуклонов в ядре 25 МэВ.

Количество нуклонов A в ядре называют *массовым числом*. Известны ядра с массовым числом от 1 до 292. Число протонов Z определяет *заряд ядра* и называется *зарядовым числом* или *атомным номером* элемента. Электрический заряд ядра положителен и по абсолютному значению равен сумме зарядов электронов атома (так как атом в целом электрически нейтрален). К 2006 г. было известно 108 химических элементов, т. е. $Z = 1, 2, \dots, 108$. «Известно» означает, что исследованы химические свойства. Существуют и более тяжелые элементы, синтезированные в лабораториях, но химические свойства их еще не исследованы.

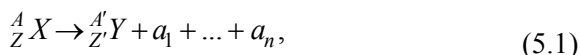
Число нейтронов $N = A - Z$. В настоящее время обнаружено более 3900 атомных ядер, представляющих собой различные сочетания протонов Z и нейтронов N . По существующим оценкам, число атомных ядер может составлять $(7,0 \dots 7,5) \cdot 10^3$.

5. РАДИОАКТИВНОСТЬ

5.1. Общие положения

Определение радиоактивности. Условие распада. *Радиоактивность* — свойство атомных ядер самопроизвольно (спонтанно) изменять свой состав (заряд, массовое число) путем испускания элементарных частиц или ядерных фрагментов.

Схему превращения ядра можно представить следующим образом:



где X , Y — материнское (исходное радиоактивное) и дочернее (продукт распада) ядра; a_1, \dots, a_n — прочие частицы (обычно $n = 1, 2$ или 3). Среди частиц a_n могут быть атомные ядра, например ядра гелия, осколки спонтанного деления и др. Ядра Y и частицы a_n называют продуктами радиоактивного распада.

Чисто механический распад на составляющие фрагменты хорошо описывают соотношения теоретической механики. Пусть тело массой M при $v = 0$ самопроизвольно распадается на две разлетающиеся со скоростями $v_1 \neq 0$ и $v_2 \neq 0$ части. Пусть их массы m_1 и m_2 , полные энергии E_1 и E_2 . Закон сохранения энергии $Mc^2 = E_1 + E_2$ (в левой части — энергия покоя исходного тела). При $v_1 \ll c$ и $v_2 \ll c$ энергии продуктов распада

$$E_1 \approx m_1 c^2 + m_1 v_1^2 / 2 > m_1 c^2,$$

$$E_2 \approx m_2 c^2 + m_2 v_2^2 / 2 > m_2 c^2,$$

так как $v_1 \neq 0$ и $v_2 \neq 0$. Следовательно, закон сохранения энергии выполняется, если $M > m_1 + m_2$. В этом случае тело может самопроизвольно распадаться. Если же $M < m_1 + m_2$, то тело устойчиво к распаду, т. е. и для распада ему необходимо сообщить извне энергию, не меньшую энергии связи:

$$E_{\text{св}} = m_1 c^2 + m_2 c^2 - M c^2.$$

6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

6.1. Излучение и его характеристики

Сначала термин «*излучение*» традиционно применяли только к электромагнитным волнам, в первую очередь к световым, т. е. к электромагнитному излучению. Развитие физики и техники потребовало использовать этот термин для более широкого класса явлений, относящихся к переносу энергии независимо от типа переносящих ее частиц (или волн).

Излучение, взаимодействие которого с веществом приводит к образованию ионов разного знака, принято называть *ионизирующим* (непосредственно ионизирующим). Оно может состоять из протонов, α -частиц, осколков деления, т. е. из заряженных частиц, обладающих кинетической энергией, достаточной для ионизации (превращения электрически нейтральных атомов и молекул в ионы) при атомных столкновениях. Косвенно к ионизирующему относят излучение, которое в результате взаимодействия со средой может создать непосредственно ионизирующее излучение. Оно состоит из фотонов, нейтронов, нейтральных мезонов и др.

Взаимодействие излучения с частицами, атомами или ядрами среды относят к электромагнитному и ядерному взаимодействиям. В физике ядерных реакторов наибольший интерес представляет сильное взаимодействие нейтронов с ядрами среды: получение энергии основано на преобразовании (делении) ядер под действием нейтронов.

Основные характеристики излучения — плотность частиц, поток, плотность потока частиц. Одна из основных характеристик нейтронного излучения — флюенс нейтронов.

Обычно в единичном объеме в единицу времени находится не одна, а много частиц, поэтому вводится понятие *плотности* N частиц. В общем случае N — число dn частиц в момент времени t в единичном объеме dV , т. е. $N = dn/dV$, где N — в см^{-3} .

Иногда (например, в физике реакторов и в теории переноса излучения) вводят дифференциальную плотность частиц — число

7. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЧАСТИЦ С ЯДРАМИ

7.1. Качественные отличия квантово-механических представлений об энергетической зависимости сечений

В классической механике столкновение двух частиц определяется их скоростями и прицельным расстоянием R' , на котором они прошли бы одна мимо другой не взаимодействуя (рис. 7.1). Строго говоря, прицельное расстояние определяется иначе (см. рис. 6.7). В результате сечение взаимодействия, например, частицы с ядром определяется как сумма их эффективных геометрических поперечных сечений:

$$\sigma = \pi r^2 + \pi R^2.$$

При $r \ll R$ эффективное сечение $\sigma \approx \pi R^2$.

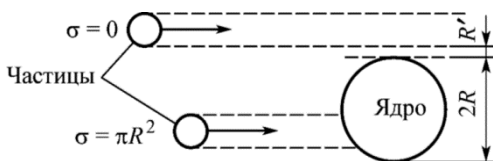


Рис. 7.1. Механизм взаимодействия частицы с ядром

В квантовой механике понятия траектории и прицельного расстояния при определенной скорости не имеют смысла (в силу принципа неопределенности Гейзенберга), поэтому правомерно говорить лишь о вероятности отклонения (рассеяния) на тот или иной угол частиц в результате их столкновения.

При малых энергиях частиц, когда доминируют их волновые свойства (условие «медленности» частиц, при котором они ведут себя как волны, см. в § 6.2), микросечение взаимодействия определяется как $\sigma \sim \pi \lambda^2$, где λ — длина волны налетающей частицы. На зависимости микросечений от скорости (или кинетической энергии) налетающей частицы возможны *резонансы*, в которых сечение вза-

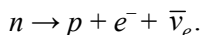
8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ

8.1. Свойства свободного нейтрона

В 1932 г. английский физик Дж. Чедвик на основе анализа экспериментов, проведенных во Франции, Германии и Италии, открыл нейтрон — нейтральную частицу массой, приблизительно равной массе протона. Нейтрон открыт в реакции (α, n) на ядра бериллия.

Нейтроны и протоны одинаково ведут себя в процессах, вызванных сильным взаимодействием, поэтому нейтрон и протон иногда рассматривают как одну частицу (нуклон), которая может находиться в двух разных состояниях, различающихся электрическим зарядом (заряд нейтрона $< 10^{-17}e$, протона — $(1 \pm 10^{-15})e$, где e — заряд электрона).

Масса нейтрона ($939,6 \text{ МэВ}/c^2$) немного больше массы протона ($938,3 \text{ МэВ}/c^2$), следовательно, возможен радиоактивный распад нейтрона с образованием протона:



При этом выделяется энергия $0,782 \text{ МэВ}$. Период полураспада нейтрона $T_{1/2} \approx 11$ мин. Поскольку среднее время жизни свободного нейтрона $870 \dots 900 \text{ с}$ (888 с усредненное по нескольким измерениям), т. е. намного больше длительности ядерных взаимодействий, радиоактивный распад нейтрона не влияет на ядерные взаимодействия. Однако время жизни свободного нейтрона не столь велико, и в экспериментах большой длительности необходим источник нейтронов.

Нейтроны участвуют во всех видах взаимодействия. Сильное взаимодействие проявляется в рассеянии нейтрона на протоне, во взаимодействии нейтрона с другими элементарными частицами и ядрами. Участие в электромагнитном взаимодействии определяется наличием у нейтрона магнитного момента. В результате нейтрон взаимодействует с электронными оболочками атомов и с ядрами, что используют для исследования строения вещества. Слабое взаи-

ЧАСТЬ III

ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ

Физика ядерных реакторов, по сути, является приложением к ядерной физике низких энергий, или прикладной ядерной физикой низких энергий. Ядерная физика низких энергий вышла на прикладной и инженерный уровни развития задолго до разработки теоретической базы, что лишний раз подтверждает актуальность практического получения ядерной энергии. В 1919 — 1932 гг. были построены первые ускорители заряженных частиц до энергии $E \sim 1$ МэВ. Первый ядерный реактор создан под руководством Э. Ферми и запущен в декабре 1942 г. — менее чем через четыре года после открытия явления деления тяжелых ядер нейтронами, а теоретическое предположение о неэлементарности нуклонов, положившее начало современной теории ядерного взаимодействия, было высказано в 1964 г.

Ядерные реакторы привлекательны с точки зрения производимых ими продуктов: энергии и нейтронов, которые позволяют не только поддерживать цепную реакцию деления, но и решать различные задачи, встающие перед ядерной энергетикой по мере ее развития: кроме производства энергии это наработка вторичного горючего и изотопов (в том числе трансурановых элементов), трансмутация долгоживущих радиоактивных отходов в стабильные или короткоживущие. Что касается энергетических реакторов, то предпочтение отдается атомным электростанциям (АЭС), поскольку электричество — наиболее удобная форма передачи и потребления энергии.

Специфика ядерной энергетики — возможность обеспечения самозащищенности реакторов от тяжелых аварий и утилизации радиоактивных отходов.

9. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЕЛЕНИЯ

9.1. Основные факторы, обеспечивающие цепную реакцию деления

Реакция деления тяжелых ядер нейтронами может быть осуществлена при наличии делящегося материала, например, урана и нейтронов. Как правило, ядро урана делится на два осколка (два новых ядра с меньшей атомной массой), которые мгновенно испускают в среднем два или три быстрых нейтрона (число нейтронов деления обозначают символом ν_f) со средней энергией около 2 МэВ. Эти нейтроны могут делить другие ядра урана, что позволяет реализовать *цепную реакцию деления*. В общем случае к цепным относят ядерные реакции, в которых частицы, вызывающие их, образуются как продукты этих реакций. Пока известна только одна цепная реакция — реакция деления тяжелых ядер нейтронами. Исторически первой исследовали возможность реализации цепной реакции (n , $2n$) на легких ядрах. Однако энергия образующихся нейтронов оказывается недостаточной для осуществления подобных реакций, т. е. реакция (n , $2n$) на ядрах лития или бериллия, строго говоря, не является цепной. Поэтому важно, чтобы в цепной реакции выделялась энергия и кинетическая энергия частиц (продуктов реакции) была достаточной для реализации аналогичной ядерной реакции.

Цепная реакция может быть *самоподдерживающейся*. Для ее обеспечения необходим один нейтрон из числа ν_f , который вызовет деление следующего ядра. Остальные нейтроны лишние, т. е. избыточные по отношению к самоподдерживающейся реакции. Нейтрон может покинуть систему (такой процесс называют *утечкой*), поглотиться ураном или другим материалом и не вызвать деления. Следовательно, для самоподдерживающейся цепной реакции деления необходимо, чтобы рождалось более одного нейтрона. Незатухающая во времени самоподдерживающаяся цепная реакция деления тяжелых ядер возможна лишь при наличии критической массы делящихся материалов. *Критической* называют минимальную массу материала, в которой возможна самоподдерживающаяся цепная реакция деления. Если масса делящихся материалов превышает критическую, то может произойти «разгон» системы вследствие увеличения скорости реакции деления (пропорциональна числу рождающихся нейтронов). Подобный процесс характерен для атомной бомбы — надкритической систе-

10. ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ

10.1. Энерговыделение в реакции деления ядер

Продукты деления (осколки, нейтроны, γ -кванты, β -частицы, антинейтрино) разлетаются в разных направлениях с той или иной скоростью. Взаимодействуя с ядрами среды, они теряют энергию. Эта энергия выделяется в виде теплоты главным образом в ядерном топливе. Пробег относительно легких (по сравнению с осколками деления) частиц в материалах реактора, как правило, превышает размер топливной таблетки, и энергия, уносимая этими частицами, может выделиться за пределами топливного элемента и активной зоны реактора.

Дополнительный источник энерговыделения в реакторе — ядерные реакции захвата нейтронов, причем определенный вклад вносит реакция радиационного захвата, поскольку при энергиях нейтронов, характерных для ядерных реакторов деления, $\sigma_c \approx \sigma_{n,\gamma} \gg \sigma_{n,2n} + \sigma_{n,3n} + \dots + \sigma_{n,p} + \sigma_{n,\alpha} + \dots$ (средние и тяжелые ядра).

Итак, поглощение нейтронов ядрами среды сопровождается выделением энергии. Поскольку $\sigma_a = \sigma_f + \sigma_c$, основные процессы с выделением энергии в реакторе — деление ядер и захват нейтронов.

При делении одного ядра урана или плутония среднее энерговыделение составляет 200...210 МэВ, причем большая часть энергии выделяется непосредственно в топливе и практически мгновенно (см. § 8.7). Энергия, уносимая β -частицами и γ -квантами, может выделиться в виде теплоты на значительном расстоянии от места деления (вне топлива реактора).

Свыше 80 % энергии деления ядер уносится осколками в виде кинетической энергии, которая превращается в теплоту по мере торможения их в веществе (по мере столкновения с другими ядрами). Положительно заряженные осколки разлетаются под действием сил кулоновского отталкивания с начальной скоростью

11. ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

11.1. Основные требования к энергетическим системам будущего

Задачи ядерной энергетики. Доля ядерной энергетики в производстве электроэнергии невелика (в нашей стране 1/6 часть). В будущем по мере загрязнения окружающей среды выбросами тепловых электростанций и истощения запасов органического топлива ядерная энергетика займет ведущее положение. В текущем столетии прогнозируется значительный рост численности жителей Земли и повышение потребления энергии на душу населения. Эту задачу смогут решить лишь ядерная или термоядерная энергетика. Если, например, к середине XXI в. и удастся осуществить управляемую в течение длительного времени термоядерную реакцию синтеза легких ядер, то на промышленный (энергетический) уровень термоядерная энергетика сможет выйти лишь к концу века. Таким образом, единственным реалистическим источником энергии, который обеспечит растущие потребности человечества в XXI в., является ядерная энергетика с реакторами деления тяжелых ядер.

Энергоисточники будущего должны удовлетворять следующим основным требованиям: *производство полезной энергии, безопасность, обеспеченность топливом.*

Из всех известных на сегодня энергоисточников будущего, способных обеспечить растущие потребности человечества в энергии, доведен до практической реализации лишь один — ядерная энергетика с реакторами деления тяжелых ядер. Опыт эксплуатации АЭС с такими реакторами показывает, что при условии радикального повышения их безопасности ядерная энергетика экономически эффективна и минимально воздействует на экологию.

Применительно к ядерной энергетике основные требования следующие:

экономическая эффективность (конкурентоспособность);

безопасность, основанная на детерминистическом исключении всей совокупности тяжелых аварий с недопустимыми выбросами радиоактивных веществ;

12. ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ

12.1. Основные понятия

Ядерный топливный цикл — последовательность повторяющихся производственных процессов, связанных с добычей урановой руды, ее переработкой и очисткой от сопутствующих продуктов (примесей); разделением изотопов урана в целях обогащения ядерного топлива нуклидом ^{235}U ; изготовлением топлива; использованием его в реакторе, включая режимы перегрузки; хранением и переработкой ОЯТ; хранением и утилизацией радиоактивных отходов (РАО).

В справочнике по атомной энергетике ядерный топливный цикл определен как комплекс мероприятий для обеспечения функционирования ядерных реакторов, осуществляемых в системе предприятий, которые объединены между собой потоком ядерного материала и включают в себя урановые рудники, заводы по переработке урановой руды и конверсии урана, обогащению и изготовлению топлива, ядерные реакторы, хранилища ОЯТ и заводы по переработке ОЯТ, а также связанные с ними промежуточные хранилища и хранилища для захоронения РАО.

Переход к крупномасштабной ядерной энергетике требует решения нетрадиционных проблем топливного цикла: физической защиты на всех его стадиях от хищения материалов, которые могут быть использованы для производства ядерного оружия; безопасного обращения с плутонием и включения его в топливный цикл (мировые запасы плутония к концу XX в., по разным оценкам, составляли 1,2...1,6 тыс. т, в том числе 230...280 т оружейного плутония, а к середине XXI в. увеличатся до 2,8...3,5 тыс. т за счет извлечения из ОЯТ); безопасного обращения с РАО, включая трансмутацию долгоживущих отходов.

Различают открытый и замкнутый топливные циклы.

Топливный цикл, предполагающий переработку ОЯТ для извлечения из него делящихся материалов и их последующего использования в качестве ядерного топлива (изготовления нового топлива), называют *замкнутым*.

13. ТРАНСМУТАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

13.1. Отходы ядерной энергетики

Специфика ядерной энергетики состоит в том, что практически все ее отходы радиоактивны. (В определенной мере это компенсируется малым объемом отходов: не более 5...7 % объема топлива).

Основные пути попадания радионуклидов в организм человека — через органы дыхания и пищеварения. Поэтому *биологическая опасность* РАО определяется отношением активности каждого нуклида к его предельно допустимой концентрации в воздухе или воде. По оценкам А.Н. Шмелёва, для разбавления до безопасного уровня РАО, полученных при работе одного реактора типа ВВЭР-1000 в течение года, требуется количество воды, сопоставимое с объемом озера Байкал, т. е. около $1,3 \cdot 10^{13} \text{ м}^3$.

В табл. 13.1 приведены значения относительной биологической опасности некоторых нуклидов после десятилетней выдержки (т. е. через 10 лет после извлечения из реактора).

Необходимо отметить, что утилизация отходов практически не вызывает затруднений при незначительной доле ядерной энергетики в производстве энергии и малом времени эксплуатации реакторной техники. Однако значение утилизации существенно возрастает по мере развития ядерной энергетики и тем более при широкомасштабном строительстве АЭС.

Таблица 13.1. **Относительная биологическая опасность некоторых нуклидов после десятилетней выдержки**

Нуклид	Относительная биологическая опасность	Нуклид	Относительная биологическая опасность
^{137}Cs	10^{-2}	^{129}I	10^{-6}
^{241}Am	10^{-3}	^{240}Pu	10^{-6}
^{244}Cm	$0,8 \cdot 10^{-3}$	^{239}Pu	$6 \cdot 10^{-7}$
^{238}Pu	$4 \cdot 10^{-5}$	^{237}Np	$2 \cdot 10^{-7}$
^{243}Am	$1,1 \cdot 10^{-5}$	^{99}Tc	$1,5 \cdot 10^{-7}$

14. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА СИНТЕЗА

14.1. Ядерные реакции, положенные в основу получения энергии

На роль энергоисточников будущего, удовлетворяющих сформулированным в гл. 10 основным требованиям (производство полезной энергии, безопасность, обеспеченность топливом), могут претендовать реакторы деления тяжелых ядер, синтеза легких ядер и электроядерные установки.

В основе работы таких систем лежат ядерные реакции деления и синтеза (рис. 14.1). Получение энергии возможно при делении тяжелых ядер на более легкие осколки и синтезе легких ядер в более тяжелые. При этом наибольшая энергия выделяется, если продукты реакции — магические или (лучше) дважды магические ядра. Для таких ядер удельная энергия связи максимальна (см. § 4.2).

Для осуществления цепной реакции деления необходимы делящийся материал (ядерное горючее) и нейтроны. При использовании в качестве делящегося материала тяжелых нуклидов с нечетным числом нейтронов присоединение нейтрона, обладающего сколь угодно малой кинетической энергией, может привести к делению ядра. При этом выделяется энергия (около 200 МэВ при делении одного ядра урана). Нейтрон электрически нейтрален, следовательно, кулоновский барьер отсутствует. Ядерная реакция деления идет через образование составного ядра. Другой способ получения энергии в реакции деления — глубокое расщепление ядер под действием высокоэнергетических частиц, например протонов, разогнанных в ускорителе. Процесс носит лавинообразный характер и получил название spallation-реакции (см. § 6.4). Если в качестве мишени использовать гало-ядра, перегруженные нейтронами, велика вероятность выбивания нейтронов из ядер мишени. Системы, в которых мишень окружена бланкетом (глубоко подкритической системой) из отвального урана или младших

15. ПОДКРИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, УПРАВЛЯЕМЫЕ УСКОРИТЕЛЕМ

15.1. Возможности использования подкритических систем для трансмутации радиоактивных отходов

Электроядерные установки разрабатываются с 1950-х годов для производства энергии и наработки вторичного ядерного горючего — ^{239}Pu . Бомбардируя мишень протонами или электронами, разогнанными в ускорителе до высоких энергий, можно получать нейтроны, обладающие кинетической энергией, которая превышает порог деления тяжелых ядер с четным числом нейтронов (^{238}U , долгоживущие младшие актиниды).

Бланкет, окружающий мишень, представляет собой глубоко подкритическую систему, содержащую обычно отвалый уран (с высокой концентрацией ^{238}U) или младшие актиниды, подлежащие трансмутации. Поскольку КПД таких систем невелик, они представляют интерес для комплексного решения двух задач: трансмутации отходов и производства энергии.

Большинство концепций подкритических систем, управляемых ускорителем, предполагает применение протонного ускорителя и ядерного реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим охлаждением.

Рассматриваются системы с прямой трансмутацией радиоактивных отходов.

В последние десятилетия рассматривается возможность использования подкритических систем, управляемых ускорителем, для трансмутации РАО. Впервые такую идею выдвинули независимо друг от друга американский физик Э.О. Лоуренс и российский физик академик Н.Н. Семенов. Экспериментально идея была подтверждена группой ученых во главе с В.И. Гольданским в начале 1950-х годов на ускорителе в ОИЯИ.

Сегодня в нескольких странах разработано около десятка проектов больших и малых электроядерных устройств.

16. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РЕАКТОРОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

16.1. Предыстория развития новых технологий

Последние два-три десятилетия кардинально изменили мнение ученых о законах, связывающих вероятность аварии и ее последствия, о способах предотвращения техногенных катастроф и, в частности, способах обеспечения безопасности объектов ядерной энергетики. Это основано на следующих объективных факторах.

1. По мере развития индустриального общества и ядерной энергетики к началу 1980-х годов сформировалось мнение, отражающее объективную статистику катастроф на промышленных объектах и транспорте. Согласно этому мнению зависимость вероятности аварий (в том числе на объектах ядерной энергетики) от ущерба или последствий (человеческие жертвы или затраты на мероприятия по их предотвращению) близка к распределению Гаусса: наиболее вероятные аварии характеризуются небольшим, а маловероятные — большим ущербом, т. е. техногенные катастрофы должны происходить крайне редко, а несерьезные аварии — достаточно часто.

Однако накопленная к концу XX в. статистика катастроф на промышленных объектах и транспорте несколько изменила привычное представление: вероятность аварий слабо зависит от ущерба; во всяком случае, эта зависимость не аппроксимируется нормальным распределением, а ближе к экспоненциальному. Есть основания полагать, что в недалеком будущем на смену экспоненциальному распределению придет равномерное: тяжелые аварии и незначительные аварийные ситуации будут равновероятны.

2. До первых серьезных аварий на АЭС была уверенность в том, что все аварийные ситуации с недопустимыми выбросами радиоактивных веществ в окружающую среду можно предотвратить при использовании технических (инженерных) систем обеспечения безопасности. Сформировалась так называемая «инженерная»

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прошедшее столетие ознаменовалось серией крупных открытий в физике, кардинально изменивших наше представление сначала о фундаментальной структуре материи, затем о составе и свойствах окружающего нас материального мира. На рубеже XX и XXI вв. было установлено, что Вселенная на 96 % состоит из не известных нам форм материи и энергии.

Значительные успехи в области ядерной и нейтронной физики позволили создать компактные энергетические установки, в которых реализуются ядерные реакции синтеза или деления. Эти установки характеризуются аномально высокой плотностью энерговыделения. Современные наука и технологии оперируют уже не только микро- и нано-, но и фемтометрами. Это, например синтез новых химических элементов, в том числе так называемых трансактиноидов, и новых материалов с заданными свойствами, получение новых элементарных частиц, а в недалеком будущем, возможно, частиц темной материи.

Основные способы производства энергии в масштабах, полностью обеспечивающих потребности человечества, связаны с трансмутацией атомных ядер. Наибольшие успехи достигнуты в развитии технологий реакторов деления тяжелых ядер. При переходе к замкнутому топливному циклу такие реакторы способны обеспечить человечество энергией на длительную перспективу. По разным прогнозам, вклад ядерной энергетики, основанной на реакторах деления тяжелых ядер, в мировое производство энергии будет увеличиваться. К середине XXI столетия в России ожидается переход к крупномасштабной ядерной энергетике. Концепция реактора естественной безопасности может быть реализована в рамках существующих технологий. Это быстрый реактор БРЕСТ со свинцовым теплоносителем и мононитридным топливом.

Реакторы термоядерного синтеза — более отдаленная перспектива. Строящийся международный экспериментальный термоядерный реактор ITER позволит отработать термоядерные технологии производства электроэнергии — наиболее удобной для использования формы энергии. В последние годы сделаны значительные шаги в реализации проектов энергетических установок синтеза легких атомных ядер. На 2019 г. на территории Франции запланирован физический пуск реактора ITER с

инерционным удержанием плазмы. Ожидается, что с 2026 г. установка ITER сможет работать в энергетическом режиме.

В октябре 2010 г. в США прошло первое успешное испытание самой большой в мире демонстрационной установки NIF инерциального управляемого термоядерного синтеза. Подобная установка сооружается во Франции (LMJ) и разрабатывается в России (УФЛ-2М). Массовое строительство промышленных термоядерных реакторов следует ожидать не ранее конца XXI столетия.

Электроядерные установки, или ADS, по причине низкого КПД для производства энергии пока не перспективны. Потенциальные возможности ядерных реакторов деления, термоядерных реакторов синтеза и электроядерных установок в обеспечении все возрастающих потребностей человечества в энергии могут быть реализованы при удовлетворении ряда требований, главные из которых — производство полезной энергии, безопасность и обеспеченность топливом. Другие известные энергетические установки в принципе не смогут удовлетворить этим требованиям.

Для России все еще остается некоторый запас по времени, необходимый для создания безопасных энергоисточников будущего. Около трети мировых запасов органического топлива сосредоточено на территории нашей страны при населении лишь 2 % мирового. Как сохранить органику для нужд человечества (главным образом неэнергетических) и для новых поколений, как обеспечить энергетическую и военную безопасность такой богатой ресурсами страны? Какими будут энергоисточники недалекого и отдаленного будущего, покажет время. Ясно лишь, что принцип их действия будет основан на превращении атомных ядер, а в недалеком будущем, возможно, и отдельных нуклонов. Трансмутация атомных ядер ускоряет эволюционные процессы в природе. Спонтанная эволюция в природе идет по направлению к «среднему» (будущее принадлежит золотой середине) или «желтому» (среднему цвету пятицветной радуги в китайской философии): тяжелые ядра путем радиоактивных распадов стремятся перейти в разряд более легких (средних), легкие в недрах звезд синтезируются в более тяжелые. Но такие же процессы происходят в ядерных реакторах деления, установках ядерного синтеза и управляемых ускорителем подкритических системах. Получая энергию в результате трансмутации атомных ядер, мы значительно ускоряем эволюционные процессы. Если среднее время жизни ядра ^{235}U в природе составляет около 10^8 лет, то время, за которой реализуется реакция деления нейтроном этого же ядра в ядерном реакторе, — около 10^{-14} с. Полное извлечение тяжелой воды (дейтерия как топлива термоядерных реакторов) приведет к снижению уровня мирового океана на 0,5 м. При переходе к крупномасштабной ядерной энергетике и длительном функционировании ядерных реакторов в качестве основного энергоисточника в будущем закономерно возникнет вопрос: как сохранить атомные ядра, иначе говоря, окружающий нас мир таким же прекрасным в своем разнообразии, каков он есть, для будущих поколений?

Некоторые специалисты, работающие в области ядерных технологий, уже прогнозируют развитие ядерных реакторов деления и синтеза на несколько тысячелетий вперед. Насколько это необходимо? Нужна ли такая «забота» об обеспеченности энергией будущих поколений? Ведь наши далекие предки не заготавливали дрова на тысячи лет вперед. Разумно предположить, что по мере развития ядерных энергетических технологий, ядерной и термоядерной энергетики будут найдены и другие эффективные энергоисточники, возможно, принципиально новые.

Ядерные технологии изначально развивались как военные. В настоящее время это технологии двойного назначения. Военная и мирная составляющие ядерной техники и технологий тесно связаны: не развивая «мирный атом», можно потерять «военный атом», и наоборот. Концепция быстрых реакторов естественной безопасности позволит развивать ядерную энергетику, не привязываясь к «военному атому». Топливный цикл таких установок физически защищен от распространения материалов, которые могут быть использованы при создании оружия массового поражения. Подобные энергоблоки можно экспортировать в страны, не обладающие ядерным оружием, не нарушая режим нераспространения.

Использование ядерных технологий в военных целях ограничено не только нормами международного права, которые могут изменяться, но и здравым смыслом. Относительно долгоживущие актиниды (в том числе искусственно синтезированный плутоний) и тяжелые изотопы водорода привлекательны и как ядерное топливо, и как сырье для создания оружия массового поражения. Если разработка какой-либо энергетической системы или оружия не противоречит законам природы и эта система востребована, то она рано или поздно может быть создана. Так было с ядерными и термоядерными боезарядами, так будет и с гафниевой бомбой, принцип действия которой не противоречит физическим законам, если в ней появится необходимость. Рано или поздно ядерное оружие станет достоянием всего человечества, всех государств, если, конечно, не уничтожит человеческую цивилизацию раньше. Несмотря на режим нераспространения, на все международные соглашения, оно будет распространяться, напоминая сценарий игры преследования, когда небольшая группа стран, обладающая ядерным оружием (в терминах теории игр — «убегающие игроки»), не позволяет другим государствам развивать технологию производства оружия массового поражения, а эти другие государства все-таки пытаются создать свою бомбу («догоняющие игроки»).

Опыт существования человеческой цивилизации показывает, что при развитии любых новых технологий, если эти технологии как-то, хотя бы косвенно, можно использовать для создания оружия, то именно оружие и создается в первую очередь. Можно лишь надеяться, что человек разумный останется человеком духовным, каким и создал его Господь.

ЛИТЕРАТУРА

- Белл Д., Глестон С.* Теория ядерных реакторов / Пер. с англ. под ред. В.Н. Артамкина. М.: Атомиздат, 1974.
- Блан Д.* Ядра, частицы, ядерные реакторы / Пер. с фр. Н.В. Самсоненко. М.: Мир, 1989.
- БРЕСТ-ОД-300 / Под ред. Е.О. Адамова, В.В. Орлова. М.: Изд. ФГУП НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, 2001.
- Галанин А.Д.* Введение в теорию ядерных реакторов на тепловых нейтронах. М.: Энергоатомиздат, 1990.
- Ганев И.Х.* Физика и расчет реактора: Учеб. пособие для вузов / Под общ. ред. Н.А. Доллежала. М.: Энергоатомиздат, 1992.
- Гуревич И.И., Протасов В.П.* Нейтронная физика: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1997.
- Давыдов А.С.* Квантовая механика: Учеб. М.: Наука, 1973.
- Ииханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П.* Частицы и атомные ядра. М.: МГУ, 2005.
- Климов А.Н.* Ядерная физика и ядерные реакторы: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2002.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Квантовая механика (нерелятивистская теория) (Сер. Теоретическая физика: В 10 т.). Т. III. М.: Наука, 1989.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория поля (Сер. Теоретическая физика: В 10 т.). Т. II. М.: Наука, 1973.
- Лукьянов С.Ю., Ковальский Н.Г.* Горячая плазма и управляемый термоядерный синтез. М.: МИФИ, 1997.
- Мартинсон Л.К., Смирнов Е.В.* Квантовая физика М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. (Физика в техническом университете).
- Мухин К.Н.* Экспериментальная ядерная физика: Учеб. для вузов: В 2 кн. М.: Энергоатомиздат, 1993.
- Намбу Ё.* Кварки / Пер. с яп. И.И. Иванчика. М.: Мир, 1984.
- Наумов А.И.* Физика атомного ядра и элементарных частиц: Учеб. пособие. М.: Просвещение, 1984.
- Окунев В.С.* Моделирование нейтронно-физических процессов в ЯЭУ: Учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
- Основы экспериментальных методов ядерной физики: Учеб. пособие для вузов / А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- Справочник по ядерной энерготехнологии / Пер. с англ. под ред. В.А. Легасова / Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун. М.: Энергоатомиздат, 1989.
- Уолтер А., Рейнольдс А.* Реакторы-размножители на быстрых нейтронах / Пер. с англ. А.А. Ванькова, В.В. Яровицина. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Фейнберг С.М., Шихов С.Б., Троянский В.Б.* Теория ядерных реакторов: Учеб. для вузов: В 2 т. Т. 1. Элементарная теория реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
- Широков Ю.М., Юдин Н.П.* Ядерная физика. М.: Наука, 1980.
- Шмелев А.Н.* Физические аспекты обезвреживания радиоактивных отходов ядерной энергетики: Текст лекции // Всесоюз. шк. по теор. физике им. В.М. Галлицкого. М.: МИФИ, 1990.
- Ядерный век: наука и общество. (Посвящается 100-летию со дня рождения И.В. Курчатова) / Гл. ред. В.Г. Асмолов. М.: ИздАТ, 2004.

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Августин Аврелий Блаженный (354—430), 76
Андерсон Карл Дейвид (1905—1991), 24, 86
Армбрустер Петер (р. 1931), 119
Арцимович Лев Андреевич (1909—1973), 423
Астон Фрэнсис Уильям (1877—1945), 17, 373, 374

Басов Николай Геннадиевич (1922—2001), 420
Беккерель Антуан Анри (1852—1908), 128
Бете Ганс Альбрехт (1906—2005), 83
Блатт Джон Маркус (1921—1990), 221
Боголюбов Николай Николаевич (1909—1992), 69
Бозе Шатъендрат (1894—1974), 41
Бор Нильс Хенрик Давид (1885—1962), 109, 112, 178
Бор Оге Нильс (1922—2009), 112
Боте Вальтер Вильгельм Георг (1891—1957), 17
Брейт Грегори (1899—1981), 34, 237

Вайнберг Стивен (р. 1933), 50, 77
Вайскопф Виктор Фредерик (1908—1944), 67
Вайцеккер Карл Фридрих фон (1912—2007), 103
Вейнберг Элвин Мартин (1915—2006), 249
Венециано Габриэль (р. 1942), 73, 74, 76, 77, 79
Вигнер Юджин Пол (1902—1995), 34, 237, 249
Виллард Поль Ульриш (1860—1924), 129
Вильсон Чарлз Томсон Рис (1869—1959), 25

Галанин Алексей Дмитриевич (р. 1924), 283
Гамов Георгий Антонович (1904—1968), 146
Ган Отго (1879—1968), 192
Ганев Игорь Христович (р. 1927), 283
Гаудсмит Сэмюэл Абрахам (1902—1978), 39
Гейзенберг Вернер Карл (1901—1976), 17
Гелл-Манн Мюррей (р. 1929), 19, 27, 42
Герц Генрих Рудольф (1857—1894), 212

Герц Густав Людвиг (1887—1975) 377
Гёпперт-Майер Мария (1906—1972), 110
Глэшоу Шелдон Ли (р. 1932), 77
Гольданский Виталий Иосифович (1923—2001), 134, 436

Дирак Поль Адриен Морис (1902—1976), 24

Жолио-Кюри Ирен (1897—1956), 133, 134
Жолио-Кюри Фредерик (1900—1958), 133, 134

Зельдович Яков Борисович (1914—1987), 239, 391, 436

Иваненко Дмитрий Дмитриевич (1904—1994), 17, 85
Ипсилантис Томас Джон (1928—2000), 25

Йенсен Йоханнес Ханс Даниель (1907—1973), 110

Капица Петр Леонидович (1894—1984), 355
Кокрофт Джон Дуглас (1897—1967), 57
Комптон Артур (1892—1962), 212
Корк Брюс (1916—1994), 25
Коуэн Клайд (1919—1974), 20, 151
Крохин Олег Николаевич (р. 1932), 420
Кюри Пьер (1858—1906), 134

Ледерман Леон Макс (р. 1922), 25, 431
Ленард Филипп Эдуард Антон фон (1862—1947), 212
Ленгмюр Ирвинг (1881—1957), 417
Лоуренс Эрнест Орландо (1901—1958), 436, 437

Майорана Этторе (1906—1938), 151
Макмиллан Эдвин Метисон (1907—1991), 113, 437
Марков Моисей Александрович (1908—1994), 23
Марсен Эрнест (1889—1970), 17
Мёссбауэр Рудольф Людвиг (1929—2011), 153
Моттelson Бенджамин Рой (р. 1926), 112
Мюнценберг Готфрид (р. 1940), 119

Намбу Ёитиро (р. 1921), 12, 69
Нишиджима Кацухико (р. 1926), 42
Ньютон Исаак (1643—1727), 15

Оганесян Юрий Цолакович (р. 1933), 117, 122
Оккиалини Джузеппе (Беппо) Паоло Станислао (1907—1993), 86
Орлов Виктор Владимирович (р. 1930), 442, 457, 475, 476, 492, 502

Паули Вольфанг Эрнст (1890—1958), 20, 41, 133, 148, 151
Пауэлл Сэйил Фрэнк (1903—1969), 86
Пенроуз Роджер (р. 1931), 76
Перл Мартин Льюис (1927—2014), 21, 22
Петржак Константин Антонович (1907—1998), 134, 192
Пиччиони Орест (1915—2002), 25
Поликанов Сергей Михайлович (1926—1994), 112, 196
Понтекорво Бруно Максимович (1913—1993), 21

Райнес Фредерик (1918—1998), 20, 151
Резерфорд Эрнест (1871—1937) 10, 17, 128, 131
Рентген Вильгельм Конрад (1845—1923), 127
Ридберг Йоханнес Роберт (1854—1919), 34
Рихтер Бертон (р. 1931), 28, 29
Розен Натан (1909—1955), 61
Руббиа Карло (р. 1934), 437

Салам Абдус (1926—1996), 50, 77
Сахаров Андрей Дмитриевич (1921—1989), 391, 392, 423
Сегре Эмилио Джино (1905—1989), 25
Семёнов Николай Николаевич (1896—1986), 436, 437
Сиборг Гленн Теодор (1912—1999), 115
Складовская-Кюри Мария (1867—1934), 134
Содди Фредерик (1877—1956), 17
Спитцер Лайман (младший) (1914—1997), 424
Стейнбергер Джек (р. 1921), 431
Столетов Александр Григорьевич (1839—1896), 212
Струминский Борис Владимирович (1939—2003), 69
Струтинский Вилен Митрофанович (1930—1993), 196

Тавхелидзе Альберт Никифорович (1930—2010), 68
Тамм Игорь Евгеньевич (1895—1971), 84, 391, 392, 422
Тинг Сэмюэл Чжаочжун (р. 1936), 28, 29
Томсон Джозеф Джон (1856—1940), 17, 212

Уиллер Джон Арчибальд (1911—2008), 130
Уиттен Эдвард (р. 1951), 52
Уленбек Джордж Юджин (1900—1988), 39
Уолтон Эрнест (1903—1995), 57, 412

Фейнман Ричард Филипс (1918—1988), 67
Ферми Энрико (1901—1954), 96, 128, 143, 241, 242, 304
Флёрв Георгий Николаевич (1913—1990), 110, 129, 192, 207
Френкель Яков Ильич (1894—1952), 107

Хиггс Питер (р. 1929), 12, 15, 40, 51, 53, 54
Хокинг Стивен Уильям (р. 1942), 75

Цвейг Джордж (р. 1937), 19, 27
Цукерман Вениамин Аронович (1913—1993), 435

Чедвик Джеймс (1891—1957), 17, 243
Чемберлен Оуэн (1920—2006), 25

Шапиро Федор Львович (1915—1973), 240
Шварц Мелвин (1932—2006), 429
Шмелёв Анатолий Николаевич (р. 1937), 394
Штрассман Фриц (Фридрих Вильгельм) (1902—1980), 192

Эддингтон Артур Стэнли (1882—1944), 101
Эйнштейн Альберт (1879—1955), 16, 23, 41, 61, 72, 73, 75, 76, 212
Эльзасер Вальтер Мориц (1904—1991), 107

Юкава Хидэки (1907—1981), 85, 86, 89

Ястров Роберт (1925—2008), 82

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ *

- Адроны 1.2, 2.3, 2.4, 2.5, 3.3, 6.7
Активная зона 9.3, 10.1, 10.3, 11.1, 11.2, 13.3, 16.3, 16.4, 16.7—16.14
Альфа-распад (α -распад) 4.5, 5.1, 5.7, 8.10, 9.1, 9.2
- Барионная материя** 1.2, 1.10
Барионы 1.2, 2.2, 2.4, 2.5
Барн 1.2
Барьер деления 4.3, 4.4, 5.7, 6.6, 8.7
— кулоновский 5.2, 5.7, 6.5, 6.6, 6.8, 8.3, 8.7, 8.8, 14.1, 14.3
— реакции 6.5
— центробежный 5.2, 5.7, 6.5, 6.6, 6.9, 8.8
Беккерель (единица измерения активности) 5.5
Бета-распад (β -распад), бета-превращения (β -превращения) 1.2, 2.5, 3.1, 5.1, 5.2, 5.7, 6.6, 8.7, 13.1, 14.5
- Взаимодействие гравитационное** 1.1, 1.6, 2.5, 8.1
— касательное 6.7
— нуклон-нуклонное 3.4, 4.3, 6.4, 6.5
— сильное 1.1, 1.5—1.8, 2.1—2.8, 3.2, 4.1, 4.3, 5.2, 6.3, 6.7, 8.1, 8.8, 14.5
— слабое 1.1, 1.5—1.8, 2.1, 2.5, 4.1, 5.2, 5.7, 6.7
— цветное 1.6, 2.1—2.8
— электромагнитное 1.1, 1.6, 1.7, 2.1, 2.5, 3.1, 3.2, 4.1, 5.2, 6.1, 6.7, 6.8, 14.5
— электрослабое 1.7, 1.8, 2.8, 5.7
— ядерное 1.1, 1.6, 1.7, 2.1, 3.1—3.4, 6.1, 6.3, 6.5, 6.7, 7.5, 8.1, 14.2
Виртуальные частицы 1.6, 2.7, 3.4
- Газокинетический коэффициент размножения нейтронов 9.4,
Газокинетическое уравнение переноса нейтронов (уравнение Больцмана) 9.3
Гало нейтронное (протонное) 4.1, 15.1
Гамма-излучение (γ -излучение) и гамма-кванты (γ -кванты) 1.2, 1.9, 4.3, 5.1, 5.2, 5.7, 6.4, 6.6, 6.8, 8.7, 8.8, 8.10, 12.6, 10.1, 10.3, 10.4, 12.6, 13.2, 14.5
Глубоконеупругие передачи 6.7
Глюон 1.2, 1.6, 1.8, 2.1, 2.4, 2.7, 3.4
- Делительная изомерия 5.7, 6.6
Диффузионное приближение 8.5, 9.4
Диффузия тепловых нейтронов 9.4
Длина Планка 1.2, 1.3, 1.7, 2.5, 2.6, 2.8
Долина (полоса) стабильности атомных ядер (область стабильных ядер) 4.1, 4.5, 5.7, 8.7
Доплеровское уширение резонансов (доплер-эффект) 8.8, 13.3, 16.3, 16.13
- Жесткость нейтронного спектра** 9.4
- Закон Гейгера — Нэттола** 5.7
— Гленденина 8.8
— ослабления излучения 6.2
— радиоактивного распада 5.3, 6.2, 9.2
— сохранения четности 6.7
— Фика 8.5
— «1/v» (закон Ферми) 8.9
Замедляющая способность 9.1, 9.4
Заряд лептонный 1.2, 1.5
— барионный 1.2, 2.2

*Ссылки даны на параграфы.

— электрический 1.2, 2.2, 2.3, 4.1, 6.3, 6.5, 8.1
— ядерный (боезаряд ядерный) 12.6
Зарядовая независимость 3.3
— симметрия 3.3

Изоспин (изотопический или изобарический спин) 2.2, 3.3

Кадмиевая граница 8.2

Кварки 1.2, 1.5—1.9, 2.1—2.8, 3.2, 3.4

Кластер 5.1, 8.7

Конверсия внутренняя 5.7

Коэффициент воспроизводства

(КВ) 11.3, 12.1, 12.2, 16.9, 16.10, 16.11, 16.12, 16.13, 16.14

— конверсии 11.3

— обогащения 12.4

— ослабления излучения 6.1, 10.1

— прилипания 14.5

— размножения нейтронов 9.3, 13.3, 15.3, 16.10

— и эффект реактивности 9.3, 16.3, 16.6, 16.8, 16.10—16.14

Кюри (единица измерения активности) 5.5

Лептоны 1.2, 1.3, 1.5—1.8, 5.7, 6.7

Летаргия нейтрона 9.4

Магические числа и ядра 4.1—4.5, 8.7, 8.8, 8.9, 16.9, 16.10

Масса критическая 9.1, 9.3, 12.6,

— кварка 1.2

— нейтрона и протона 8.1

— покоя нейтрино 1.8, 5.7

— приведенная 6.5, 7.3, 8.9

Массовое число 4.1—4.3, 4.5, 5.1, 5.5, 5.7, 6.5, 6.6, 8.5, 8.7, 8.8, 9.4

Мезоатом 14.5

Мезоны 1.2, 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 3.4, 6.1, 6.4, 6.7, 14.5

Модель стандартная 1.2, 1.5, 1.7, 1.8, 1.10, 2.2

Нейтринные осцилляции 1.2, 5.7

Нейтрон 1.2, 1.4—1.7, 1.10, 2.2, 2.4, 2.5, 2.8, 3.1—3.5, 4.1—4.5, 5.1, 5.2, 5.7, 6.1, 6.3—6.8, 7.3, 7.5—7.7,

8.1—8.10, 9.1—9.4, 10.1—10.5, 11.1, 11.3, 12.1, 12.3, 12.5, 12.6, 13.1—13.4, 14.1, 14.3—14.6, 15.1, 15.3, 16.2, 16.3, 16.4, 16.7—16.15

Оболочки нейтронные и протонные (оболочечная структура ядра) 4.1—4.5, 6.6, 8.7, 8.8

Параметр делимости 6.6

Пинч-эффект 14.3

Плазма 1.2, 14.3—14.5

— кварк-глюонная 1.2,

Радиус (размер) и форма атомного ядра 4.1, 4.3, 7.1, 7.3, 8.3, 8.8, 8.9

Радиоактивные отходы (РАО) 11.3, 12.1, 12.3, 12.6, 13.1—13.4, 15.2, 16.2, 16.6

Рассеяние потенциальное и резонансное 6.4, 7.3—7.5, 8.6

Реакция глубокого расщепления ядра (*spallation*-реакция) 6.3, 6.4, 8.10, 14.1, 15.1

— неполного проникновения дейтрона в ядро 14.1

— слияния (средних и тяжелых ядер) 4.4, 6.7

— синтеза (легких ядер) 4.2, 6.7, 12.6, 14.2, 14.4, 14.6

Резонанс (нестабильная частица) 1.2, 2.3

— (резонансный характер энергетической зависимости сечений) 1.2, 2.3, 6.2, 6.4, 6.7, 6.8, 7.1, 7.2, 8.2, 8.8, 8.9, 9.1, 16.3, 16.12, 16.13

Ридберговские атомы 1.2

Составное ядро 1.2, 6.3, 6.4, 6.6, 6.7, 7.5, 8.4, 8.6, 8.7, 14.2

Спектр 5.7, 7.2, 9.3, 13.2, 13.3, 16.9

— запаздывающих нейтронов 8.7

— Максвелла 8.2, 9.4

— мгновенных нейтронов деления (спектр деления) 8.7

— Ферми 8.2, 9.4

Средняя логарифмическая потеря энергии 9.4

Ферми (единица измерения длины) 1.2

— (единица измерения микросечений) 8.5

Формула Вея и Вигнера 10.4

— Блатта и Вайскопфа 7.2

— (формулы) Брейта — Вигнера 7.5, 8.9

— Вайцзеккера 4.2

— Ньютона 7.2

— Уатта 8.8

Центральное и нецентральное соударения 6.3—6.7, 7.5, 8.3, 8.8, 8.9, 9.4

Четность пространственная 5.7, 6.7

Число Лоусона 14.3

Электронвольт 1.2

Эффект и энергия спаривания 4.1—4.4, 6.6, 8.7

Эффективная доля запаздывающих нейтронов 8.8, 9.3, 13.3, 16.8, 16.10, 16.11, 16.13

Ядерное топливо 6.8, 8.8, 9.1, 9.3, 10.1, 12.1, 12.2, 13.4, 14.1, 16.2, 16.3, 16.6, 16.9—16.14

Ядерный реактор 1.2, 3.2, 4.2, 5.7, 5.8, 6.1—6.5, 6.8, 8.1, 8.2, 8.5, 8.7—8.10, 9.1—9.4, 10.1—10.5, 11.1—11.3, 12.1, 12.2, 12.5, 13.1 —13.4, 14.1, 14.3, 15.3, 16.1—16.14

Ядра в виде пузыря (bubble-nuclear) 4.4

— дважды магические 4.1, 4.2, 4.5, 5.7, 8.7—8.9, 14.1, 16.9, 16.10

— делящиеся (делящиеся материалы) 8.5, 8.8, 8.9, 11.3, 12.3, 12.6

— деформированные 4.3, 4.4

— нейтронно-избыточные или протонно-избыточные (ядра, перегруженные нейтронами или протонами) 4.4, 4.5, 8.7

— нестабильные — 5.2

— предшественники запаздывающих нейтронов 8.7, 9.3

— сферические (сферически симметричные) 4.3, 6.8

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ КО ВТОРОМУ ИЗДАНИЮ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ К ПЕРВОМУ ИЗДАНИЮ	7
ВВЕДЕНИЕ	9
Часть I. СОВРЕМЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА	12
1. ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МАТЕРИИ	13
1.1. Виды фундаментальных взаимодействий	13
1.2. Микромир и фундаментальные составляющие материи	13
1.3. Характерные размеры частиц	37
1.4. Образование элементов	37
1.5. Некоторые специфические свойства частиц микромира	39
1.6. Основные характеристики фундаментальных взаимодействий....	44
1.7. Объединение взаимодействий	50
1.8. Стандартная модель	52
1.9. Связь ядерной физики и космофизики. Современные ускорители заряженных частиц	54
1.10. Темная материя и темная энергия	58
2. СИЛЬНОЕ (ЦВЕТНОЕ) ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	63
2.1. Общие положения	63
2.2. Некоторые характеристики сильновзаимодействующих частиц	63
2.3. Первые модели адронов	66
2.4. Цветовой заряд. Квантовая хромодинамика	67
2.5. Проявление распадов кварков в распадах адронов	68
2.6. Удержание цвета. Кварк-антикварковый потенциал (потенциал цветного взаимодействия)	70
2.7. Обменный характер сильного взаимодействия	71
2.8. Теория струн (один из подходов к объединению взаимодействий)	72
Часть II. ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА НИЗКИХ ЭНЕРГИЙ	79
3. ЯДЕРНОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ	82
3.1. Ядерная материя	82
3.2. Ядерные силы и приближения моделей сильного взаимодействия	83
3.3. Основные свойства ядерных сил	84
3.4. Обменный характер ядерного взаимодействия	84
4. СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР	91
4.1. Состав и структура атомных ядер	91
4.2. Физические основы получения энергии при превращении ядер	98
4.3. Модели ядра	106
4.4. Стабильность ядер	110
4.5. «Треугольники стабильности» атомных ядер	120

5. РАДИОАКТИВНОСТЬ	126
5.1. Общие положения	126
5.2. Стабилизированные процессы распада	131
5.3. Закон радиоактивного распада	132
5.4. Характеристики радиоактивного распада	133
5.5. Активность источника. Накопление и спад радиоактивности	135
5.6. Цепочка превращений	137
5.7. Виды радиоактивности	138
5.8. Радиоактивные ряды	157
6. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ	163
6.1. Излучение и его характеристики	163
6.2. Основные характеристики взаимодействия излучения с веществом	165
6.3. Ядерные реакции. Основные характеристики ядерных реакций	170
6.4. Механизмы ядерных реакций	177
6.5. Барьеры реакций	185
6.6. Вынужденное деление ядер	192
6.7. Взаимодействие заряженных частиц с веществом	199
6.8. Взаимодействие γ -квантов с веществом	208
7. КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕРЕЛЯТИВИСТ- СКИХ ЧАСТИЦ С ЯДРАМИ	219
7.1. Качественные различия квантово-механических представлений об энергетической зависимости сечений	219
7.2. Резонансный характер зависимости $\sigma(E)$	220
7.3. Упругое рассеяние	223
7.4. Упругое рассеяние при наличии неупругих процессов. Неупругое рассеяние	231
7.5. Формулы Брейта — Вигнера	234
7.6. Учет спинов сталкивающихся частиц	237
7.7. Нейтронная оптика	238
8. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕЙТРОНОВ С ВЕЩЕСТВОМ	243
8.1. Свойства свободного нейтрона	243
8.2. Классификация нейтронов	244
8.3. Особенности взаимодействия. Классификация ядерных реакций	246
8.4. Основные характеристики взаимодействия нейтронов с веществом	247
8.5. Упругое рассеяние нейтронов на ядрах	253
8.6. Неупругие взаимодействия нейтронов с ядрами	255
8.7. Деление ядер нейтронами	273
8.8. Общий вид энергетической зависимости микросечений. Расчет микросечений	294
8.9. Библиотеки оцененных ядерных данных	307
8.10. Источники нейтронов	308

Часть III. ЯДЕРНЫЕ РЕАКТОРЫ	315
9. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ДЕЛЕНИЯ	316
9.1. Основные факторы, обеспечивающие цепную реакцию деления	316
9.2. Природный реактор в Окло	320
9.3. Устройство и работа ядерного реактора деления	322
9.4. Реальные события и основные физические теории, используемые при расчете реактора	334
10. ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЕ В ЯДЕРНОМ РЕАКТОРЕ	347
10.1. Энерговыведение в реакции деления ядер	347
10.2. Энерговыведение в реакциях захвата нейтронов	349
10.3. Суммарное мгновенное энерговыведение в реакторе	349
10.4. Запаздывающее энерговыведение	350
10.5. Аккумулирование энергии при высоких флюенсах	353
11. ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	354
11.1. Основные требования к энергетическим системам будущего	354
11.2. Пути повышения безопасности атомных электростанций	358
11.3. Воспроизводство делящегося материала	359
12. ЯДЕРНЫЙ ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ	362
12.1. Основные понятия	362
12.2. Топливо ядерных реакторов	364
12.3. Этапы топливного цикла	367
12.4. Методы разделения изотопов	373
12.5. Целесообразность использования отработанного ядерного топлива	383
12.6. Нераспространение делящихся материалов	384
13. ТРАНСМУТАЦИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ	394
13.1. Отходы ядерной энергетики	394
13.2. Физические основы трансмутации радиоактивных отходов	396
13.3. Некоторые особенности быстрых реакторов — выжигателей радиоактивных отходов	402
13.4. Международные программы по утилизации плутония и радиоактивных отходов	406
14. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА СИНТЕЗА	409
14.1. Ядерные реакции, положенные в основу получения энергии	409
14.2. Реакции синтеза	412
14.3. Физические основы реализации реакции термоядерного синтеза	414

14.4. Термоядерные реакторы и технологии	421
14.5. Мюонный катализ	429
14.6. Реализация реакций синтеза на ускорителях. Нейтронный генератор	433
15. ПОДКРИТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, УПРАВЛЯЕМЫЕ УСКОРИТЕЛЕМ	436
15.1. Возможности использования подкритических систем для трансмутации радиоактивных отходов	436
15.2. Физические принципы работы электроядерной установки	437
15.3. Основы конструкции	438
16. ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ РЕАКТОРОВ ЕСТЕСТВЕННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ	441
16.1. Предыстория развития новых технологий	441
16.2. Общие требования к энергетическим реакторам нового поколения	443
16.3. Тяжелые аварии на атомных станциях	445
16.4. Подходы к анализу безопасности реакторов	451
16.5. Использование формализма теории игр в задачах анализа и обоснования безопасности реакторов	454
16.6. Основополагающие принципы проектирования реакторов нового поколения	456
16.7. Моделирование режимов ATWS на начальном этапе проектирования реакторов. Анализ неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций	466
16.8. Области самозащитенности	467
16.9. Реакторы на быстрых нейтронах нового поколения как возможный вариант достижения идеалов естественной безопасности в рамках существующих технологий	468
16.10. Специфические факторы опасности быстрых реакторов. Физические принципы исключения реактивных аварий	476
16.11. Минимизация пустотного эффекта реактивности	485
16.12. Доплеровский эффект и коэффициент реактивности	492
16.13. Факторы, способствующие приближению к идеалам естественной безопасности в рамках концепции БРЕСТ	501
16.14. Резервы концепции БРЕСТ при переходе к энергоблокам большой мощности	504
16.15. Термоядерные реакторы естественной безопасности	514
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	521
Литература	524
Именной указатель	525
Предметный указатель	529

Учебное издание

ФИЗИКА В ТЕХНИЧЕСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

Окунев Вячеслав Сергеевич

**ОСНОВЫ ПРИКЛАДНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
И ВВЕДЕНИЕ В ФИЗИКУ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

Редактор *Е.Н. Ставицкая*
Технический редактор *Э.А. Кулакова*
Художник *А.С. Ключева*
Корректоры *Н.А. Фетисова, Р.В. Царева*
Компьютерная графика *О.В. Левашовой*
Компьютерная верстка *А.Ю. Ураловой*

Оригинал-макет подготовлен
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Подписано в печать 09.12.2014. Формат 60×90/16.
Усл. печ. л. 33,5. Тираж 500 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5, стр. 1.
press@bmstu.ru
<http://www.baumanpress.ru>

Типография МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
e-mail: baumanprint@gmail.com