

**Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования Московской области
«Международный университет природы, общества и человека «Дубна»
(университет «Дубна»)**

Факультет естественных и инженерных наук

Кафедра «Ядерная физика»

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ

Деление атомных ядер

направления 010700.68 «Физика»

Магистерская программа «Физика ядра и элементарных частиц»

Дубна, 2011 г.

УМК разработан (ученая степень, ученое звание, фамилия, имя, отчество разработчиков) _____
профессор кафедры «Ядерная физика», д.ф.-м.н. Тер-Акопьян Г.М.

Протокол заседания кафедры «Ядерная физика»

№ _____ от « ____ » _____ 201__ г.

Заведующий кафедрой _____ /Оганесян Ю.Ц./
(подпись)

СОГЛАСОВАНО

Декан факультета _____ /Деникин А.С. /
(подпись)

« ____ » _____ 201__ г.

Проректор по учебной работе _____ /Моржухина С.В. /
(подпись)

« ____ » _____ 201__ г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА	4
ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ	11
1. Выписка из ГОС ВПО	13
2. Аннотация	13
3. Цели и задачи дисциплины.....	13
4. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.....	14
5. Объем дисциплины и виды учебной работы.....	14
6. Разделы дисциплины, виды и объем занятий	14
7. Содержание разделов дисциплины.....	15
8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.....	19
Основная литература	19
Дополнительная литература:	19
Периодические издания:.....	20
Перечень программного обеспечения.....	20
Интернет–ресурсы:	20
9. Материально-техническое обеспечение дисциплины.....	21
10 . Формы контроля и оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины	21
11 . Учебно-методические материалы	23
1. Учебно-методические материалы для студентов:.....	23
2. Методические рекомендации для преподавателей:	24
12 Материалы, устанавливающие содержание и порядок проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации	25
1. Варианты контрольных работ:.....	25
2. Билеты для проведения экзамена (зачета) и комплект практических заданий:	25
3. Вопросы для самоконтроля:.....	25
Вопросы для проведения текущего контроля освоения лекционного материала	25

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА.

Целью курса «Деление атомных ядер» является введение будущих физиков-экспериментаторов в круг научных проблем, определяющих развитие современных представлений о делении атомных ядер. Вводятся основные представления о процессе деления, вытекающие из модели жидкой капли, и показывается неспособность этой модели объяснить масс асимметрию деления, существование подбарьерных резонансов и спонтанно делящихся изомеров. В лекциях систематически излагаются современные знания по физике деления и перспективы исследований в этой области. Излагаемый материал включает: экспериментальные данные и основы теоретических моделей энергии деформации и барьерам деления тяжелых ядер, представления об условиях прохождения барьера деления, данные о времени жизни ядер по отношению к делению и объяснение этих данных, существующие представления о различных аспектах динамики деления и их связь с величинами, измеряемыми на опыте. В лекциях также подробно представлены методы и результаты исследований структур уровней во второй яме потенциального барьера, описаны экспериментальные методы исследования ядерного деления, в полном объеме описаны работы по тройному делению, объяснена связь данных этих работ с основными проблемами бинарного деления. В заключительной части представлены результаты и показаны перспективы исследований характеристик и динамики процессов деления, обнаруживаемых в ядерных реакциях на пучках тяжелых ионов.

В ходе изучения данного курса студент должен получить основные сведения о процессе деления, имеющиеся к настоящему времени, а также получить представление об основных подходах и методах изучения деления ядер и ясно представлять суть полученных экспериментальных данных по делению, а также научиться самостоятельно читать и разбираться в современных научных статьях по делению ядра.

При разработке учебно-методического комплекса «Деление атомных ядер» особое внимание уделялось тому, чтобы ее содержание было ориентировано на изложение материала с учетом современного состояния предмета, а также с использованием современных компьютерных и Интернет технологий при организации учебного процесса и самостоятельной работы студентов.

Международный университет природы, общества и человека «Дубна»
УЧЕБНО-ТЕМАТИЧЕСКИЙ (КАЛЕНДАРНЫЙ) ПЛАН ДИСЦИПЛИНЫ

Учебно-методическая карта дисциплины «Деление атомных ядер»

Кафедра «Ядерная физика»,

направление 010700 «Физика» Магистерская программа «Физика ядра и элементарных частиц», курс 5 семестр 10 2011/2012 учебного года

Утверждаю:

проректор Моржухина С.В,
 «___» _____ 201__г.

Виды и содержание учебных занятий										Самостоятельная работа студентов			
Номер и дата недели	Лекции (....1.... час в неделю)*						Практические занятия (__ час в неделю)	Лабораторные работы (__ час. в неделю)		Вид задания	Содержание	часы	форма контроля
	В аудитории			Самостоятельное изучение				№	название				
	Дата лекции	час	Содержание	Исп. ТСО	Содержание и раздел учебника (глава, параграф)	Форма контроля							
1 неделя		2	Открытие ядерного деления: работы Э.Ферми, О.Хана-Ф.Штрассмана, Л.Майтнер, Ф.Жолио, Н.Бора-Дж.Уиллера, Я.Френкеля, Г.Флерова-К.Петржака.	К, ПЛ	1, гл. VII, § 49, 50; материалы лекции	К			А,Л	Подготовка по лекциям. Модель жидкой капли, основные выводы теории Френкеля и Бора-Уиллера. Параметр делимости. Глобальная зависимость энергии связи ядер от массы. Оценки полной энергии, выделяемой при делении тяжелого ядра, и кинетической энергии осколков деления.	3	К	
2 неделя		2	Энергия деформации ядра, параметры, определяющие форму делящегося ядра. Барьер деления. Высота барьера деления по модели жидкой капли. Обнаружение спонтанно делящихся изомеров и подбарьерного деления. Недостатки модели жидкой капли.	К, ПЛ	1, гл. VII, § 51; материалы лекции	К			А,Л	Подготовка по лекциям. Эксперименты по обнаружению спонтанно делящихся изомеров и подбарьерного деления. Спектр энергии мгновенных нейтронов испускаемых при делении.	3	К	
3 неделя		2	Модель оболочек, учитывающая ядерную деформацию. Диаграммы Нильсона. Метод оболочечной поправки Струтинского для расчета энергии деформации ядра. Двугорбый барьер деления. Предсказание острова стабильности сверхтяжелых ядер.	К, ПЛ	1, гл. II, § 10, 12; 2, гл. 6, § 9, 12; материалы лекции	К			А,Л	Подготовка по лекциям. Объяснение явлений изомерии формы и подбарьерного деления с учетом существования двугорбого барьера деления. Методы измерения барьеров деления ядер.	3	К	
4 неделя		2	Периоды полураспада по отношению к спонтанному делению, формула Хилла-Уиллера. Параметр делимости. Определение критического значения параметра делимости.	К, ПЛ	1, гл. VII, § 45; 2, гл. 8, § 1; материалы лекции	К			А,Л	Расчет проницаемости одногорбого барьера деления. Систематика периодов спонтанного деления ядер с атомным номером $Z \geq 90$.	3	К	
5 неделя		2	Параметр инерции делящегося ядра. Понятие кинетической	К, ПЛ	1, гл. II, § 11; материалы лекции	К			А,Л	Подготовка по лекциям. Феноменологические описания	4	К	

			энергии коллективного потока. Трудности модели жидкой капли. Микроскопический подход к расчету тензора инерции делящегося ядра. Параметры второй ямы и время жизни изомеров формы. Систематика периодов полураспада изомеров формы.								параметра инерции ядерного движения. Принцип минимума действия и траектория деления ядра. Численный расчет массового параметра гидродинамического потока в приближении безвихревого движения. Примеры расчетов ядерной инерции по модели принудительного движения.		
6 неделя		2	Факторы, приводящие к увеличению времени жизни нечетных ядер. Состояния класса I и II. Гамма распад изомера формы. Образование и распад возбужденных ядер как способ изучения спонтанно делящихся изомеров. Основные понятия статистической модели ядра. Гамма распад изомеров формы.	К, ПЛ	материалы лекции	К					Подготовка по лекциям. Объяснение малой ширины изомерного состояния во второй яме по отношению к гамма переходу в основное состояние ядра. Измерение энергии состояния во второй яме. Измерения времени жизни спонтанно делящихся изомеров с короткими периодами полураспада.	3	
7 неделя		2	Природа состояний во второй яме. Одночастичные уровни, ротационные полосы, вибрационные состояния. Делящееся ядро с энергией возбуждения ниже барьера деления. Деление и гамма распад вибрационных состояний.	К, ПЛ	материалы лекции	К				А,Л	Подготовка по лекциям. Инерции ядерной системы и щель в схеме уровней ядра. Влияние нечетного нуклона на величину тензора инерции. Энергия спаривания и энергия специализации на втором барьере. Методика и данные экспериментов по изучению свойств спонтанно делящихся изомеров. Схема образования изомера формы при распаде возбужденного компаунд ядра.	4	К
8 неделя		2	Изучение тонкой структуры спектров делительных резонансов методом измерения спектров протонов, испущенных в реакции (d,pf). Спектры уровней во втором минимуме потенциальной энергии ^{240}Pu .	К, ПЛ	материалы лекции	К				А,Л	Подготовка по лекциям. Плотность уровней во второй яме. β и γ вибрационные моды возбуждения. Угловое распределение осколков деления из состояний, имеющих определенные квантовые характеристики. Способы заселения (и изучения) состояний ядер с энергией возбуждения ниже барьера деления. Измерение угловых распределений осколков деления. Фотоделение и деление, вызванное резонансными нейтронами.	3	К
9 неделя		2	Информация о динамике деле-	К,	материалы лекции					А,Л	Подготовка по лекциям.	3	

		<p>ния получаемая из данных о кинетической энергии и масс асимметрии осколков. Множественность мгновенных нейтронов, выводы о деформации ядра в точке разрыва. Угловой момент осколков деления. Распределение величины энергии, выделившейся к моменту достижения точки разрыва. Теоретические модели динамики деления. Микроскопические модели. Стохастическое описание динамики деления возбужденного ядра. Уравнение Фоккера-Планка, время деления как время прихода ядра на седловую точку. Коэффициент трения. Формулы ядерной вязкости. Время перехода к точке разрыва.</p>	ПЛ							<p>Схема уровней изомерной ямы плутония-240. Методика экспериментов по изучению спектров уровней во второй яме потенциального барьера деления.</p>		
10 неделя	2	<p>Деление возбужденных ядер, полученных в реакциях слияния на пучках тяжелых ионов. Симметричное деление и проявления асимметричных мод. Реакции слияния-деления, квазиделение, глубоко-неупругое ядро-ядерное взаимодействие. Время эволюции делящегося ядра, энергия возбуждения внутренних и коллективных степеней свободы</p>	К, ПЛ	1, гл. XI, § 72	К				А,Л	<p>Подготовка по лекциям. Критический анализ данных о полной кинетической энергии и масс асимметрии осколков, полученных в широком диапазоне изменения атомного номера, массового числа и энергии возбуждения делящихся ядер. Измерение спектров масс и энергии осколков низко энергетического деления ядер. Динамическое описание коллективного движения после прохождения седловой точки. Эффекты динамики деления, объясняемые учетом парного взаимодействия. Анализ динамики деления плутония-240 на основе генераторно-координатного метода. Диффузионная модель деления. Расчеты симметричного деления урана-236 по методу Хартри-Фока. Выводы о поверхности энергии деформации ядра плутония-240.</p>	4	К

11 неделя		2	Угловой момент компаунд ядра, диссипация коллективного движения и появление углового момента. Измерения угловых распределений осколков деления, определение механизма слияния-деления или квазиделения.	К, ПЛ	1, гл. XI, § 72	К				А,Л	Подготовка по лекциям. Расчеты поверхности потенциальной энергии при ядерном взаимодействии. Множественность нейтронов, испущенных до разрыва шейки, рассчитанная для квазистационарного предела времени деления, времени перехода на седловую точку и времени спуска. Данные экспериментов по измерениям множественности нейтронов и дипольного излучения ядерных систем, испытывающих слияние-деление и квазиделение. Анализ данных на основе статистической модели с учетом ядерной вязкости.	4	К
12 неделя		2	Угловой момент осколков деления. Осцилляции, «рождающие» спин осколков. Статистическое равновесие угловых моментов, связанных с коллективными модами деления. Спектры энергии гамма квантов осколков деления.	К, ПЛ	материалы лекции	К				А,Л	Подготовка по лекциям. Зависящие от спина формы ядра в седловой точке. Моменты инерции делящихся ядер в седловой точке и в точка разрыва. Угловые распределения осколков, полученные для составных систем различной массы в ядерных столкновениях с различными масс асимметриями. Коллективные моды ядерного движения, генерирующие составляющие углового момента, параллельные и перпендикулярные оси деления. Теоретические предсказания и данные экспериментов о зависимости спина осколков от масс асимметрии. Оценки спинов осколков по данным измерения множественности гамма квантов осколков. Испарительные коды, применяемые для количественного определения распределений угловых	4	К

											моментов осколков деления.		
13 неделя		2	Прецизионные исследования массовых и энергетических спектров осколков низкоэнергетического деления тяжелых ядер. Тройное деление. Объяснение спектров энергии и угловых распределений ядерных кластеров, испущенных при тройном делении. Понятие «энергетической цены» тройного деления.	К, ПЛ	1, гл. X, § 70;	К				А,Л	Подготовка по лекциям. Холодное деление, холодное сильно деформированное деление. Симметричное деление, испытываемое ядрами фермия. Кинематические расчеты тройного деления. Данные о средней величине и ширине спектра полной кинетической энергии осколков, полученные в широком диапазоне изменения параметра делимости ядра. Корреляции выходов тройных частиц с «энергетической ценой» тройного деления.	3	К
14 неделя			Консультации, подготовка к экзамену. Экзамен										
										АЛ	Всего		
										КТП	Всего	44	

Сокращения: А - задание к практическим занятиям; Л - задание к лабораторным занятиям; К - контрольные задания; Т - типовой расчет; П - курсовой проект;

Учебная литература

№	Название, автор, год издания	Примечания
1	Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 5, Атомная и ядерная физика. М.-ФИЗМАТЛИТ, 2011	Основная
2	К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика (в 3-х т.), СПб., Издательство Лань,. 2008.	Основная
3	Калашникова В.И. Детекторы элементарных частиц: Учебное пособие для вузов /. - М.: Наука, 1966. - 408с.	дополнительная

Дата _____ Лектор _____

Утверждаю

Практ. занятия _____

зав. кафедрой _____ /Оганесян Ю.Ц./

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования Московской области
МЕЖДУНАРОДНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРИРОДЫ, ОБЩЕСТВА
И ЧЕЛОВЕКА «ДУБНА»
(университет «Дубна»)

Факультет естественных и инженерных наук
Кафедра «Ядерная физика»

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
_____ С. В. Моржухина
« ____ » _____ 20__ г.

ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Деление атомных ядер»

направления **010700.68 Физика**

Магистерская программа «Физика ядра и элементарных частиц»

Форма обучения: очная
Уровень подготовки: *магистр*
Курс (семестр): 5 (10)

г. Дубна, 2011 г.

**Программа дисциплины «Деление атомных ядер» по направлению «Физика»:
Учебная программа. Автор: – Дубна: Университет «Дубна», 2011.**

Автор программы:

д.ф.-м.н. Тер-Акопя Г.М., профессор кафедры «Ядерная физика»

(подпись)

Программа составлена в соответствии с Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования и учебным планом по направлению подготовки 010700.68 Физика.

Программа рассмотрена на заседании кафедры «Ядерная физика»

Протокол заседания № _____ от «____» _____ 201__ г.

Заведующий кафедрой _____ /Оганесян Ю.Ц./

ОДОБРЕНО декан факультета _____ /Деникин А.С./

«____» _____ 201__ г.

Рецензент:

(Фамилия, имя, отчество)

(ученая степень, звание)

(должность, кафедра или иное подразделение, организация)

Руководитель библиотечной системы _____ /В.Г. Черепанова/

1. Выписка из ГОС ВПО

Дисциплина «Деление атомных ядер» входит в блок дисциплин специализации, предусмотренный государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования в рамках Основной образовательной программы по направлению подготовки магистров 510400 «Физика», магистерская программа 510401 «Физика ядра и элементарных частиц», утвержденному МО РФ пр. № 177 ен/маг от 17.03.2000 г.

2. Аннотация

2.1. Место курса в профессиональной подготовке и требования к уровню подготовки студентов

Для изучения курса «Деление атомных ядер» студент должен обладать знаниями, полученными при изучении курсов Общей и Теоретической физики таких, как: «Ядерная физика», «Квантовая механика», «Статистическая физика», а также блока математических дисциплин.

После изучения курса «Деление атомных ядер» студент сможет применять полученные знания для творческой работы в коллективе, занимающемся современными экспериментальными исследованиями по различным направлениям физики деления. Материалы курса может являться важной составляющей при работе над подготовкой дипломного проекта.

2.2. Формы работы студентов

В ходе изучения дисциплины предусмотрено выполнение самостоятельных домашних работ. Отдельные темы теоретического курса прорабатываются студентами самостоятельно в соответствии с планом самостоятельной работы и конкретными заданиями преподавателя с учетом индивидуальных особенностей студентов.

Преподавание данной дисциплины предусматривает активное использование следующих методов обучения: мультимедийных презентаций по темам лекций и практических занятий; в т.ч. инновационных методов: ознакомлением с действующими установками ОИЯИ, использованием образовательных Интернет-ресурсов.

Перечень обязательных видов работы студента:

- посещение лекционных занятий;
- выполнение домашних работ:

2.3. Форма текущего и итогового контроля

Текущий контроль заключается в проверке домашнего задания.

Промежуточный контроль проводится с целью определения качества усвоения пройденного лекционного материала. Наиболее эффективным является его проведение в письменной форме – по контрольным вопросам, тестам, и т.п. Контроль проводится в виде сдачи всеми без исключения студентами контрольных заданий – задач во время проведения практических занятий (проводится в сроки установленные календарным планом).

В ходе изучения дисциплины студенты выполняют контрольные работы, сдают зачет по теоретической и по практической части и лабораторным работам, экзамен.

3. Цели и задачи дисциплины

Основной целью данного курса является введение будущих физиков-экспериментаторов в круг научных проблем, определяющих развитие современных представлений о делении атомных ядер. Вводятся основные представления о процессе деления, вытекающие из модели жидкой капли, и показывается неспособность этой модели объяснить масс асимметрию деления, существование подбарьерных резонансов и спонтанно делящихся изомеров. В лекциях систематически излагаются современные

знания по физике деления и перспективы исследований в этой области. Излагаемый материал включает: экспериментальные данные и основы теоретических моделей энергии деформации и барьерам деления тяжелых ядер, представления об условиях прохождения барьера деления, данные о времени жизни ядер по отношению к делению и объяснение этих данных, существующие представления о различных аспектах динамики деления и их связь с величинами, измеряемыми на опыте. В лекциях также подробно представлены методы и результаты исследований структур уровней во второй яме потенциального барьера, описаны экспериментальные методы исследования ядерного деления, в полном объеме описаны работы по тройному делению, объяснена связь данных этих работ с основными проблемами бинарного деления. В заключительной части представлены результаты и показаны перспективы исследований характеристик и динамики процессов деления, обнаруживаемых в ядерных реакциях на пучках тяжелых ионов.

4. Требования к уровню освоения содержания дисциплины.

Студенты, изучившие дисциплину «Деление атомных ядер», должны **знать**:

- 1) основные сведения о процессе деления, полученные к настоящему времени.
- 2) основные подходы и методы изучения деления ядер и ясно представлять суть полученных экспериментальных данных по делению.

Студенты, прошедшие курс «Деление атомных ядер», должны **уметь** самостоятельно читать и разбираться в современных научных статьях по делению ядра.

Студенты, прошедшие курс «Деление атомных ядер», должны иметь достаточную подготовку для творческой работы в коллективе, занимающемся современными экспериментальными исследованиями по различным направлениям физики деления.

5. Объём дисциплины и виды учебной работы¹

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры	
		10	
Общая трудоёмкость	70	70	
Аудиторные занятия:	26	26	
Лекции	26	26	
Практические занятия (ПЗ)			
Семинары			
Лабораторные работы (ЛР)			
Самостоятельная работа:	44	44	
Итоговая аттестация	экзамен	экзамен	

6. Разделы дисциплины, виды и объем занятий²

№ п.п.	Раздел дисциплины	Лекции	ПЗ(С)	ЛР	СР
1	Обзор основных результатов по делению атомных ядер	2			2
2	Энергия деформации и барьеры деления тяжелых ядер	4			6

¹ Объем часов на каждый вид учебной работы должен обязательно быть согласован с учебным планом по данной специальности.

² Для дисциплин федерального компонента (см. ГОС ВПО) разделы дисциплин и/или их содержание должны включать полное описание дисциплины, данной в ГОС ВПО.

3	Прохождение барьера деления	3			5
4	Параметры двугорбого барьера деления и время жизни изомеров формы	4			6
5	Состояния ядра во второй яме барьера деления	3			5
6	Динамика процесса деления	2			4
7	Экспериментальные методы исследования ядерного деления	3			6
8	Тройное деление	2			4
9	Пучки тяжелых ионов и ядерное деление	3			6

7. Содержание разделов дисциплины.

1. Обзор основных результатов по делению атомных ядер

- 1.1. Открытие деления ядер урана нейтронами. Опыты Фриша.
- 1.2. Спектр энергии и распределение по массе осколков деления.
- 1.3. Открытие спонтанного деления. Опыты Жолио.
- 1.4. Нейтроны деления, бета распад осколков.
- 1.5. Капельная модель Н. Бора, компаунд-ядро.
- 1.6. Зависимость от массы энергии связи ядер на нуклон.
- 1.7. Энергия деления. Баланс энергии деления ядра. Параметр делимости.
- 1.8. Условие стабильности сферической формы ядра. Энергия деформации. Барьер деления. Седловая точка.
- 1.9. Обнаружение спонтанно делящихся изомеров, изомерия формы.

2. Энергия деформации и барьеры деления тяжелых ядер

- 2.1. Картина энергии деформации в модели жидкой капли. Недостатки модели жидкой капли. Отсутствие объяснения деформации ядер в основном состоянии. Стабильность заряженной жидкой капли по отношению к асимметричным модам деформации и неспособность объяснить асимметричное деление ядер. Трудности объяснения высоты барьеров деления. Необходимость объяснения природы делительных резонансов под барьером деления и спонтанно делящихся изомеров.
- 2.2. Модель оболочек с ядерной деформацией.
- 2.3. Метод оболочечной поправки Струтинского. Проверка метода по расчетам деформации ядер в основном состоянии и асимметрии масс осколков деления.
- 2.4. Поверхность потенциальной энергии тяжелого ядра. Параметры деформации ядра, существенные для описания свойств деления.
- 2.5. Зависимость барьера деления от параметра делимости ядер.
- 2.6. Остров стабильности сверхтяжелых элементов.
- 2.7. Открытие и изучение сверхтяжелых ядер.
- 2.8. Остров стабильности деформированных ядер в окрестности магического числа нейтронов $N=164$.

3. Прохождение барьера деления.

- 3.1. Расчеты барьеров деления.
- 3.2. Вероятность прохождения барьера деления в приближении перевернутой параболы. Основные предположения теории. Формула Хилла-Уиллера. Частота делительных осцилляций.
- 3.3. Двугорбый барьер. Оценка периода спонтанного деления ядра.
- 3.4. Параметр инерции. Феноменологические формулы для параметра инерции.
- 3.5. Кинетическая энергия коллективного потока, тензор инерции.
- 3.6. Модель принудительного вращения.
- 3.7. Траектория деления в пространстве деформации ядра. Принцип наименьшего действия и расчеты периодов полураспада ядер.

4. Параметры двугорбого барьера деления и время жизни изомеров формы.

- 4.1. Область спонтанно делящихся изомеров на карте нуклидов.
- 4.2. Влияние нечетного нуклона на увеличение времени жизни по отношению к делению.
- 4.3. Энергия специализации. Феноменология периодов полураспада изомеров спонтанного деления.
- 4.4. Иные виды распада изомеров формы. Объяснение низкой вероятности гамма распада спонтанно делящихся изомеров.
- 4.5. Экспериментальные методы для определения параметров формы двугорбого барьера деления.
- 4.6. Данные о времени жизни изомеров формы и высоты первого и второго барьеров.
- 4.7. Образование и распад компаунд ядер как способ изучения спонтанно делящихся изомеров. Схема образования изомера формы при распаде возбужденного компаунд ядра.
- 4.8. Статистическая модель и оценки конкуренции процессов испарения нейтронов мгновенного деления, гамма распада и перехода во вторую яму потенциального барьера (образования изомера формы).
- 4.9. Зависимость оболочечной поправки к энергии ядра от энергии. Плотность уровней в седловой точке. Учет влияния гигантского резонанса на величину матричного элемента гамма перехода.
- 4.10. Оценки сечений испарительных реакций, приводящих к образованию изомеров формы, сравнение с экспериментом. Два класса уровней компаунд ядра, отвечающие деформациям основного и изомерного состояний.
- 4.11. Плотность состояний во второй яме. Данные по энергии изомеров формы и высоте первого и второго барьеров.

5. Состояния ядра во второй яме барьера деления

- 5.1. Типы состояний во второй яме: частично-дырочные состояния, уровни ротационных полос, вибрационные состояния.
- 5.2. Расчеты одночастичных состояний во второй яме. Энергетическая щель, энергия разрыва пары, К-изомеры.
- 5.3. Способы заселения (и изучения) ядер с энергией возбуждения ниже барьера деления: реакции испарения нейтронов из компаунд ядер, захват нейтронов, фотоделение, неупругое рассеяние протонов, альфа частиц и т.д., прямые реакции: (d,p), (t,d), (t,p) и др.
- 5.4. Распределение состояний компаунд ядра по величине переданного углового момента; измерение угловых распределений осколков деления.

- 5.5. Фотоделение четно-четного ядра. Образование слабо возбужденных ядер в реакции (d,p).
- 5.6. Деление ядер, вызванное резонансными нейтронами. Реакции (n, γ), (n,n'), (n,f).
- 5.7. Бета и гамма вибрации. Вибрационный бета резонанс во второй яме и его роль в подбарьерном делении. Примеры вибрационных резонансов во второй яме.
- 5.8. Деление в области разрешенных резонансов уровней класса I. Данные по плотности уровней классов I и II.
- 5.9. Спектроскопия уровней третьей ямы урана-234. Глубина 3-го минимума.
- 5.10. Гамма спектроскопия уровней во втором минимуме потенциальной энергии.
- 5.11. Данные об уровнях ротационных полос изомера формы и прямое определение деформации (моментов инерции) состояний во второй яме ^{240}Pu .

6. Динамика процесса деления

- 6.1. Понятия седловой точки, точки «выхода» из классически запрещенной области под барьером деления и точки разрыва. Оценка энергии перехода от седловой точки (точки «выхода») к точке разрыва.
- 6.2. Влияние динамики процесса на распределение кинетической энергии, энергии возбуждения и величины углового момента осколков деления. Значение процесса спуска в установлении массового распределения (в том числе величины четно-нечетного эффекта), асимметрии масс осколков деления.
- 6.3. Микроскопические модели. Зависящий от времени Гамильтониан ядра в приближении Хартри-Фока. Примеры микроскопических и макроскопических расчетов форм делящихся ядер.
- 6.4. Расчеты, предполагающие стохастическую природу деления. Расчеты времени жизни по отношению к делению по статистической модели Бора-Уиллера и по Крамерсу.
- 6.5. Множественность нейтронов, испущенных до разрыва шейки. Диффузионная модель деления. Детерминистическое описание процесса деления. Выбор параметров деформации. Система координат, основанная на овалах Кассини.
- 6.6. Эффект оболочек в энергии сильно деформированного ядра.
- 6.7. Сравнение расчетных масс асимметрий осколков деления с экспериментальными данными.
- 6.8. Модельные расчеты тензоров инерции и трения.
- 6.9. Сравнение расчетных значений кинетической энергии осколков с экспериментом. Оценки предразрывных значений энергии делительной моды.
- 6.10. Представления о временной шкале процессов спуска, разрыва шейки, ускорения осколков.
- 6.11. Эмпирические формулы для средней величины полной кинетической энергии осколков деления.
- 6.12. Статическая модель деления, основанная на анализе свойств делящегося ядра в точке разрыва шейки.
- 6.13. Баланс энергии, освободившейся при переходе к точке разрыва.
- 6.14. Поиски нейтронов, испущенных перед разрывом шейки.
- 6.15. Коллективные степени свободы в точке разрыва шейки, угловой момент осколков деления.

7. Экспериментальные методы исследований ядерного деления

- 7.1. Методы измерения массы и энергии осколков деления. Определение ядерного заряда осколков.

- 7.2. Данные экспериментов по измерению спектров кинетической энергии и массовых распределений осколков деления. Моды деления ядер с $Z > 90$.
- 7.3. Исследования «холодного» деления ядер. Холодное, симметричное деление ядра ^{258}Fm и других ядер, близких к ^{264}Fm .
- 7.4. Регистрация мгновенных нейтронов деления, среднее число нейтронов, распределение множественности, нейтроны, испущенные до разрыва шейки и из ускоренных осколков.
- 7.5. Независимые выходы осколков деления. Гамма излучение осколков деления.
- 7.6. Независимые выходы пар осколков. Баланс энергии деления ядра.
- 7.7. Измерение угловых моментов осколков деления.

8. Тройное деление

- 8.1. Поиски тройного деления тяжелых ядер на три осколка, примерно одинаковых по массе.
- 8.2. Наблюдаемое тройное деление как процесс, представляющий слабую ветвь деления на два осколка. Выходы тройного деления слабо возбужденных ядер актинидов.
- 8.3. Вероятности испускания третьей частицы, легкого ядра, в зависимости от его массы и заряда.
- 8.4. Представления об энергетических затратах, вызванных тройным делением.
- 8.5. Спектры энергии и угловые распределения легких ядер тройного деления. О связи этих спектров с коллективными модами движения в точке разрыва шейки.
- 8.6. Расчеты спектров энергии и углов вылета легких ядер тройного деления.
- 8.7. Определение температуры в шейке делящегося ядра ^{252}Cf по измеренным выходам ^{10}Be в основном и возбужденном состояниях при тройном делении.
- 8.8. Независимые выходы осколков, измеренные при тройном делении ^{252}Cf .
- 8.9. Моды деления, дающие вклад в тройное деление с вылетом различных легких ядер.

9. Пучки тяжелых ионов и ядерное деление

- 9.1. Новые возможности изучения ядерного деления, появившиеся с использованием ядерных реакций на пучках тяжелых ионов.
- 9.2. Деление ядер с высоким барьером деления в сравнении с ядрами с $Z > 90$.
- 9.3. Деление нагретых вращающихся ядер.
- 9.4. Изучение эмиссии пред- и постделительных делительных нейтронов. Эффективная температура делящегося ядра.
- 9.5. Зависимость высоты барьера деления от углового момента ядра.
- 9.6. Угловой момент и массовые и энергетические спектры осколков.
- 9.7. Исследования массовых спектров осколков в окрестности точки Бусинаро-Галлоне.
- 9.8. Свойства квазиделения.
- 9.9. Исследования деления слабо возбужденных ядер, образующихся в реакциях слияния.
- 9.10. Мультимодальное деление ядер в районе свинца и тория-актиния.
- 9.11. Деление ядер, далеких от β стабильности. Запаздывающее деление.
- 9.12. Значение полученных результатов для расчетов нуклеосинтеза тяжелых и сверхтяжелых ядер.

Лабораторные и практические занятия учебным планом не предусмотрены.

8. Учебно-методическое обеспечение дисциплины.

Основная литература

1. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Том 5, Атомная и ядерная физика. М.- ФИЗМАТ-ЛИТ, 2011
2. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика (в 3-х т.), СПб., Издательство Лань,. 2008.
3. Калашникова В.И. Детекторы элементарных частиц: Учебное пособие для вузов /. - М.: Наука, 1966. - 408с.
4. Любимов А. Введение в экспериментальную физику частиц / Любимов А., Киш Д. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Физматлит, 2001. - 272с.
5. Ю.М. Широков и Н.П. Юдин. Ядерная физика. М.: Наука, 1972.

Дополнительная литература:

1. Методы определения основных характеристик атомных ядер и элементарных частиц. Измерение масс, спинов, четности, поляризации и времен жизни: Пер.с англ. / Сост.-ред.Люк К.Л.Юан и Ву Цзянь-Сюн; Под ред.Л.А.Арцимовича. - М.: Мир, 1965. - 432с
2. Ядерная энциклопедия / Авт.и гл.ред. А.А.Ярошинская. - М.: Благотворительный фонд Ярошинской, 1996. - 656с.: ил.
3. Мокров Ю.В. Инструментальные методы радиационной безопасности: Учебное пособие / Мокров Юрий Владимирович; Рец. Е.А.Крамер-Агеев; Ред. В.В.Труба; Международный университет природы, общества и человека "Дубна". Кафедра биофизики. - Дубна: Международный университет природы, общества и человека "Дубна", 2007. - 155с.
4. Робертсон Б. Современная физика в прикладных науках / Робертсон Б.; Пер.с англ. под ред. Е.М.Лейкина. - М.: Мир, 1985. - 272с.:
5. Справочник по ядерной физике / Кларк Р.У., Барнес Д.Э., Перкин Дж.П. и др.; Пер.с англ. под ред. Л.А.Арцимовича. - М.: Физматгиз, 1963. - 632с.
6. Холмовский Ю.А. Толковый словарь по атомной науке и технике / Холмовский Юрий Алексеевич. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. - 344с
7. Мухин К.Н. Занимательная ядерная физика / Мухин Константин Никифорович. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 312с
8. Абрамов А.И. Измерение "неизмеримого" / Абрамов Александр Иванович. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 208с.:
9. Боровой А.А. Как регистрируют частицы (По следам нейтрино) / Боровой Александр Александрович; Под ред.П.Е.Спивака. - М.: Наука, 1981. - 176с.:
10. Дементьев В.А. Измерение малых активностей радиоактивных препаратов / Дементьев Василий Александрович. - М.: Атомиздат, 1967. - 140с.
11. Экспериментальная ядерная физика: Пер.с англ. Т.1 / Под ред. Э.Сегре. - М.: Издательство иностранной литературы, 1955. - 662с.:
12. Росси Б. Ионизационные камеры и счетчики / Росси Бруно, Штауб Г.; Пер.с англ.Г.М.Гуро и О.И.Козинец; Под ред.Г.Б.Жданова. - М.: Иностранная литература, 1951. - 240с.
13. Биркс Дж. Сцинтилляционные счетчики / Биркс Дж.; Пер.с англ.А.С.Белюсова,Е.И.Тамма; Под ред.П.А.Черенкова. - М.: Иностранная литература, 1955. - 150с.
14. Чечик Н.О. Электронные умножители / Чечик Н.О., Файнштейн С.М., Лифшиц Т.М.; Под ред. С.Ю.Лукьянова. - М.: Гостехиздат, 1954. - 420с.

15. Корф С. Счетчики электронов и ядерных частиц / Корф С.; Пер.с англ.В.А.Трофимовой; Под ред.В.И.Векслера. - М.: Иностранная литература, 1947. - 242с.
16. Льюис В.Б. Методы электрического счета альфа- и бета-частиц / Льюис В.Б.; Пер.с англ.Н.Н.Воронова; Под ред.Г.Д.Латышева. - 2-е изд. - М.: ОГИЗ; Гостехиздат, 1949. - 164с
17. Векслер В. Ионизационные методы исследования излучений / Векслер В., Грошев Л., Исаев Б. - М.; Л.: Гостехиздат, 1949. - 424с
18. Элмор В. Электроника в ядерной физике / Элмор В., Сендс М.; Пер.с англ. А.О.Вайсенберга,В.А.Троицкой; Под ред. В.В.Мигулина. - М.: Иностранная литература, 1951. - 407с.
19. Басиладзе С.Г. Быстродействующая ядерная электроника / Басиладзе Сергей Геннадьевич. - М.: Энергоиздат, 1982. - 160с.:
20. Санин А.А. Электронные приборы ядерной физики / Санин Алексей Александрович. - 2-е изд. - М.: Наука, 1964. - 624с.
21. Мелешко Е.А. Наносекундная электроника в экспериментальной физике / Мелешко Евгений Алексеевич. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 216с.
22. Полупроводниковые приборы и их применение: Сборник статей. Вып.25 / Аронов В.Л., Мазель Е.З., Волцит В.В. и др.; Под ред.Я.А.Федотова. - М.: Советское радио, 1971. - 472с.
23. Вильсон Дж. Камера Вильсона / Вильсон Дж.; Пер.с англ.Ю.Л.Кокурина и Л.Т.Барадзей; Под ред.П.А.Черенкова. - М.: Иностранная литература, 1954.

Периодические издания:

1. Успехи физических наук/ Учредитель: РАН; Гл.ред. Л.В.Келдыш. - М.: Успехи физических наук. - Журнал, выходит 1 раз в месяц. - Основан в 1918 году. - См. электронные версии статей: <http://ufn.ru/ru/articles/>.
2. Ядерная физика / Учредитель: РАН; Гл.ред. Ю.Г. Абов. - М. : Наука. - Журнал, выходит 1 раз в месяц. - Основан в 1965 году.

Перечень программного обеспечения

1. Для проведения тестов используются тестовая оболочка дистанционного обучения университета «Дубна» и локальная тестовая страница для Web-браузера JS_Test.

Интернет–ресурсы:

1. <http://nrν.jinr.ru/nrv>
2. <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
3. <http://theory.asu.ru/>
4. <http://www.chem.msu.su/rus/teaching/phys.html>
5. http://www.srcc.msu.su/num_anal/
6. <http://www.cultinfo.ru/fulltext/>
7. Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам"
8. <http://window.edu.ru/window>
9. Википедия : <http://wiki.web.ru>
10. Полнотекстовая база данных для университета «Дубна». Сайт библиотеки: <http://lib.uni-dubna.ru/biblweb>

9. Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Индикаторы радиоактивности Радекс (2 шт.),
2. Кассеты со слаборадиоактивным веществом – естественным хлоридом калия.
3. мультимедийный проектор;
4. Электронный вариант лекций: Тер-Акопьян Г.М. “Деление атомных ядер”
5. иллюстративный материал в форме компьютерных презентаций и образовательных материалов из Интернет

10. Формы контроля и оценочные средства для текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины³

Вопросы, выносимые на экзамен:

1. Энергия деления в модели жидкой капли.
2. Природа оболочечной поправки к энергии ядра. Двугорбый барьер деления и его основные характеристики.
3. Барьер деления. Проницаемость барьера и время жизни по отношению к спонтанному делению.
4. Понятие о тензоре инерции ядра.
5. Спонтанно делящиеся изомеры, изомерия формы. Факторы, определяющие время жизни спонтанно делящегося изомера. Влияние нечетного нуклона на высоту барьера деления и на параметр инерции.
6. Способы обнаружения спонтанно делящихся изомеров и измерения их времени жизни.
7. Каналы распада изомера формы.
8. Образование изомера формы при распаде возбужденного компаунд ядра.
9. Деление возбужденного компаунд ядра. Переходные состояния и вероятность деления.
10. Реакции слияния – деления как источник информации для определения параметров двугорбого барьера деления.
11. Природа состояний во второй яме.
12. Подбарьерное деление, наблюдаемое в реакциях на резонансных нейтронах, в реакциях типа (d,p), (t,d), (t,p), (p,p').
13. Вибрационные резонансы во второй яме и природа их связи с уровнями первой ямы.
14. Спектроскопия в 3-й яме урана-234. Исследование тонкой структуры уровней второй ямы ^{240}Pu .
15. Изучение спектров гамма квантов и электронов конверсии, испущенных в реакции $^{238}\text{U}(\alpha,2n)$ (описание экспериментальных методов). Общая характеристика спектров уровней, обнаруженных во втором минимуме потенциальной энергии ^{240}Pu .
16. Динамика процесса деления на стадии спуска от седловой точки к точке разрыва шейки.
17. Качественное рассмотрение микроскопических моделей, применявшихся для описания динамики деления.

³ Описывать следует только те формы контроля, которые предусмотрены программой дисциплины

18. Качественное описание детерминистического подхода к описанию процесса деления: кинетическая энергия коллективного движения, диссипация – физический смысл тензора вязкости, выбор коллективных переменных.
19. Тензор вязкости в детерминистических моделях динамики процесса спуска к точке разрыва шейки.
20. Статистическая модель деления, основанная на анализе свойств делящегося ядра в точке разрыва шейки.
21. Эксперименты по измерению кинетической энергии и спектров масс осколков деления. Понятие о холодном компактном и холодном деформированном делении.
22. Описание процесса тройного деления ядра.
23. Мгновенные гамма кванты деления. Независимые выходы осколков деления и независимые выходы пар осколков.
24. Деление ядер, полученных в ядерных реакциях с тяжелыми ионами. Новые моды деления.
25. Запаздывающее деление. Роль деления в нуклеосинтезе.
26. Квазиделение.

11. Учебно-методические материалы

1. Учебно-методические материалы для студентов:

Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:

Рабочей программой настоящей дисциплины предусмотрена самостоятельная работа студентов. Самостоятельная работа проводится с целью углубления знаний по дисциплине и предусматривает:

- чтение студентами рекомендованной литературы и усвоение теоретического материала дисциплины;
- подготовку к практическим занятиям;
- работу с Интернет-источниками;
- подготовку к сдаче коллоквиумов, выполнению тестовых заданий и сдаче зачетов и экзаменов.

Планирование времени на самостоятельную работу, необходимого на изучение настоящей дисциплины, студентам лучше всего осуществлять на весь семестр, предусматривая при этом регулярное повторение пройденного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо регулярно дополнять сведениями из литературных источников, представленных в рабочей настоящей программе дисциплины. По каждой из тем для самостоятельного изучения, приведенных в рабочей программе дисциплины следует сначала прочитать рекомендованную литературу и при необходимости составить краткий конспект основных положений, терминов, сведений, требующих запоминания и являющихся основополагающими в этой теме и для освоения последующих разделов курса.

Для расширения знаний по дисциплине рекомендуется использовать Интернет-ресурсы: проводить поиск в различных системах, сайтах и обучающих программ, рекомендованных преподавателем на лекционных занятиях.

Правила выполнения и оформления домашних работ:

В процессе самостоятельного изучения курса прикладной механики каждый студент должен выполнить домашние работы с защитой у преподавателя. Эти работы позволяют определить степень усвоения студентом учебного материала и предусматривают:

1. Самостоятельную работу с учебной литературой.
2. Решение задач на закрепление материала по различным разделам курса.

При выполнении работ студент должен придерживаться следующих требований:

1. Работу рекомендуется выполнять в отдельной тетради. На титульном листе указать номер группы, Ф.И.О. студента.
2. В начале поставить дату, тему работы. Перед изложением ответа необходимо написать полный текст вопроса. Для возможных замечаний преподавателя нужно оставить поля.
3. Работа должна быть выполнена аккуратно, почерк не должен вызывать затруднений при прочтении работы.
4. При оформлении задач необходимо написать краткое условие задачи, уравнение реакции, лежащие в основе того или иного процесса, расставить коэффициенты. Каждое действие необходимо пронумеровать и дать ему формулировку, выделить ответ.

Преподаватель оценивает работу по рейтинговой системе. Если студент получил неудовлетворительную оценку, то работа возвращается студенту для исправления и доработки, после чего снова должна быть представлена на проверку.

Студенты, не выполнившие домашние работы, не допускаются к зачетной и экзаменационной сессии.

2. Методические рекомендации для преподавателей:

Одной из задач преподавателей, ведущих занятия по настоящему курсу является выработка у студентов осознания важности, необходимости и полезности знания дисциплины для дальнейшей профессиональной деятельности. Методическая модель преподавания дисциплины основана на применении активных методов обучения.

Принципами организации учебного процесса являются:

- активное участие студентов в учебном процессе;
- проведение практических занятий, определяющих приобретение навыков решения проблемы;
- приведение примеров применения изучаемого теоретического материала к реальным практическим ситуациям.

Применяемые методы преподавания: лекционные занятия с использованием мультимедиа технологий; индивидуальные и групповые задания при проведении практических и лабораторных занятий.

Для более глубокого изучения предмета преподаватель предоставляет студентам информацию о возможности использования по разделам дисциплины Интернет-ресурсов, кафедральной и университетской библиотеки.

Содержание занятий определяется календарным планом.

При наличии академических задолженностей по практическим занятиям, связанных с их пропусками преподаватель должен выдать задание студенту в виде задач по пропущенной теме занятия.

Для контроля знаний студентов по данной дисциплине необходимо проводить текущий и промежуточный контроль.

Текущий контроль проводится с целью определения качества усвоения лекционного материала. Наиболее эффективным является его проведение в письменной форме – по контрольным вопросам, тестам и т.п. Контроль проводится в виде сдачи всеми без исключения студентами контрольных заданий – задач во время проведения практических занятий. В материалы письменных опросов студентов включаются и темы, предложенные им для самостоятельной подготовки.

Промежуточный контроль по курсу. Для контроля усвоения данной дисциплины учебным планом предусмотрен экзамен. На экзамене студентам предлагается решить ответить на 2 вопроса по материалам учебной дисциплины. Ответы на поставленные вопросы даются в устном виде. Оценка по экзамену является итоговой по курсу и проставляется в приложении к диплому.

12 Материалы, устанавливающие содержание и порядок проведения текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

1. Варианты контрольных работ:

Задача № 1. Определить предельный угол рассеяния в лабораторной системе координат для снарядоподобного фрагмента реакции $^{42}\text{Ca}(^{28}\text{Si}, ^{30}\text{Si})^{40}\text{Ca}$ при энергии столкновения 5 МэВ на нуклон.

Задача № 2. Определить пороги и теплоту реакций: $d(d, ^3\text{He})n$; $^7\text{Li}(p, n)^7\text{Be}$; $^4\text{He}(\alpha, p)^7\text{Li}$; $^{12}\text{C}(p, p')^{12}\text{C}^*(4.44 \text{ МэВ})$.

Задача № 3. Какую минимальную энергию должен иметь дейтрон, чтобы в результате неупругого рассеяния на ядре ^{10}Be возбудить состояние с энергией 1.75 МэВ?

2 Билеты для проведения экзамена (зачета) и комплект практических заданий:

Международный университет природы, общества и человека "Дубна"
Кафедра «Ядерная физика»

Экзаменационный билет № 1

Направление: Физика.

Курс 5 (семестр 10)

Магистерская программа «Физика ядра и элементарных частиц»

Дисциплина: «Деление атомных ядер»

1. Энергия деления в модели жидкой капли.
2. Деление ядер, полученных в ядерных реакциях с тяжелыми ионами. Новые моды деления.

Заведующий кафедрой ядерной физики

Ю.Ц.Оганесян

3. Вопросы для самоконтроля:

Вопросы для проведения текущего контроля освоения лекционного материала

Контрольные вопросы для проведения текущего контроля по итогам освоения отдельных разделов дисциплины и самостоятельной работы обучающегося с помощью коллоквиумов, включающих группы тем:

Образец: КОЛЛОКВИУМ К1.

По теме: *Динамика процесса деления*

1. Понятия седловой точки, точки «выхода» из классически запрещенной области под барьером деления и точки разрыва. Оценка энергии перехода от седловой точки (точки «выхода») к точке разрыва.
2. Влияние динамики процесса на распределение кинетической энергии, энергии возбуждения и величины углового момента осколков деления. Значение процесса спуска в установлении массового распределения (в том числе величины четно-нечетного эффекта), асимметрии масс осколков деления.
3. Микроскопические модели. Зависящий от времени Гамильтониан ядра в приближении Хартри-Фока. Примеры микроскопических и макроскопических расчетов форм делящихся ядер.
4. Расчеты, предполагающие стохастическую природу деления. Расчеты времени жизни по отношению к делению по статистической модели Бора-Уиллера и по Крамерсу.

5. Множественность нейтронов, испущенных до разрыва шейки. Диффузионная модель деления. Детерминистическое описание процесса деления. Выбор параметров деформации. Система координат, основанная на овалах Кассини.
6. Эффект оболочек в энергии сильно деформированного ядра.
7. Сравнение расчетных масс асимметрий осколков деления с экспериментальными данными.
8. Модельные расчеты тензоров инерции и трения.
9. Сравнение расчетных значений кинетической энергии осколков с экспериментом. Оценки предразрывных значений энергии делительной моды.
10. Представления о временной шкале процессов спуска, разрыва шейки, ускорения осколков.
11. Эмпирические формулы для средней величины полной кинетической энергии осколков деления.
12. Статическая модель деления, основанная на анализе свойств делящегося ядра в точке разрыва шейки.
13. Баланс энергии, освободившейся при переходе к точке разрыва.
14. Поиски нейтронов, испущенных перед разрывом шейки.
15. Коллективные степени свободы в точке разрыва шейки, угловой момент осколков деления.