

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Сердитова Наталья Евгеньевна
Должность: проректор по образовательной деятельности
Дата подписания: 25.08.2025 16:35:17
Уникальный программный ключ:
6cb002877b2a1ea640fdebb0cc541e4e05322d13

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

ФГБОУ ВО «ТВЕРСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Утверждаю:

Руководитель ООП

Е.В. Барабанова



«26» июня 2025 г.

Рабочая программа дисциплины

Физика атомного ядра и элементарных частиц

Закреплена за кафедрой:	Общей физики
Направление подготовки:	03.03.03 Радиофизика
Направленность (профиль):	Материалы и устройства радиоэлектроники (беспилотные системы, программно-аппаратные комплексы, системы автоматизированного проектирования)
Квалификация:	Бакалавр
Форма обучения:	очная
Семестр:	6

Программу составил(и):

канд. физ.-мат. наук, доц., Шуклов Алексей Дмитриевич

Тверь, 2025

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

Цели освоения дисциплины (модуля):

Целью освоения дисциплины является:

создание фундаментальной базы знаний, на основе которой в дальнейшем можно развивать более углубленное и детализированное изучение других разделов физики и специализированных курсов.

Задачи:

Задачами освоения дисциплины являются:

1. изучение основных принципов физики ядра и явлений, происходящих в мире элементарных частиц;
2. установление связи между различными физическими явлениями, вывод основных законов в виде математических уравнений;
3. постановка и анализ задачи, применение различных методов решения.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

Цикл (раздел) ОП: Б1.О

Требования к предварительной подготовке обучающегося:

Общий курс «Физика атомного ядра и элементарных частиц» ставит своей целью познакомить студентов с основами экспериментальной и теоретической ядерной физики с тем, чтобы выпускник физико-технического факультета имел достаточно полное представление об основных результатах и современных тенденциях в развитии молодой науки. Это касается в первую очередь: свойств атомных ядер; радиоактивности, ядерных реакций и экспериментов в физике низких, средних и высоких энергий; нуклон-нуклонных взаимодействий и свойств ядерных сил; модели атомных ядер; взаимодействия ядерного излучения с веществом; фундаментальных взаимодействий в природе; классификации элементарных частиц; современных астрофизических представлений.

Атомная физика

Дисциплины (модули) и практики, для которых освоение данной дисциплины (модуля) необходимо как предшествующее:

Квантовая механика

Физический практикум по физике атомного ядра и элементарных частиц

3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ

Общая трудоемкость	3 ЗЕТ
Часов по учебному плану	108
в том числе:	
аудиторные занятия	42
самостоятельная работа	39
часов на контроль	27

4. ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ, СООТНЕСЕННЫЕ С ПЛАНИРУЕМЫМИ РЕЗУЛЬТАТАМИ ОСВОЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ПРОГРАММЫ

ОПК-1.1: Обладает базовыми знаниями в области физики и радиофизики

ОПК-2.2: Проводит теоретическое изучение объектов, систем и процессов в рамках темы научного исследования

УК-1.1: Анализирует задачу, выделяя ее базовые составляющие

УК-1.5: Рассматривает и предлагает возможные варианты решения поставленной задачи, оценивая их достоинства и недостатки

5. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

Виды контроля в семестрах:	
экзамены	6

6. ЯЗЫК ПРЕПОДАВАНИЯ

Язык преподавания: русский.

7. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Код занят.	Наименование разделов и тем	Вид занятия	Семестр / Курс	Часов	Источники	Примечание
	Раздел 1. Свойства атомных ядер					
1.1	Ядро как совокупность протонов и нейтронов. Масса и энергия ядра. Энергия связи ядра. Капельная модель, полуэмпирическая Вайцзеккера для масс ядра, спин и магнитный момент ядра. Квадрупольный электрический момент, четность, магические числа, ядерные оболочки, обобщенная модель ядра.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.2	Радиоактивные превращения ядер. Радиоактивные семейства. Искусственная радиоактивность. Виды распадов.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.3	Взаимодействие нуклонов и свойства ядерных сил.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.4	Модели атомных ядер.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.5	Энергия связи. Формула Вайцзеккера	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.6	Бета-распад	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.7	Альфа-распад	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
1.8	Радиоактивный распад.	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
	Раздел 2. Ядерные реакции					

2.1	Ядерные реакции. Законы сохранения в ядерных реакциях. Энергия и порог реакции. Сечения реакций. Каналы реакций. Кинематика ядерных реакций. Механизмы ядерных реакций. Модель составного ядра. Резонансные ядерные реакции. Формула Брейта-Вигнера. Прямые ядерные реакции. Оптическая модель ядра.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
2.2	Взаимодействие фотонов и электронов с ядрами. Нейтронная физика. Деление ядер. Деление изотопов урана нейтронами. Цепная реакция деления. Ядерные взрывы. Ядерные реакторы. Теория подкритического ядерного реактора. Реакции синтеза легких ядер. Термоядерная энергия. Трансурановые элементы.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
2.3	Ядерные реакции	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
	Раздел 3. Взаимодействие ядерного излучения с веществом					
3.1	Взаимодействие заряженных частиц со средой. Тяжелые и легкие частицы. Потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов. Радиационные потери. Пробеги заряженных частиц. Взаимодействие нейтронов с веществом. Замедление нейтронов. Прохождение гамма-излучения через вещество: фотоэффект, Комптон – эффект, рождение электрон-позитронных пар. Эффект Вавилова – Черенкова. Дозиметрия. Биологическое действие излучения и защита от него.	Лек	6	3	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
3.2	Нейтроны. Взаимодействие с веществом.	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
3.3	Взаимодействие частиц с веществом	Ср	6	17	Л1.1 Л1.2 Л1.3	

	Раздел 4. Частицы и взаимодействия.					
4.1	Четыре типа фундаментальных взаимодействия. Константы и радиусы взаимодействия. Принципы описания взаимодействия частиц в квантовой теории поля. Переносчики взаимодействия. Основные характеристики частиц. Классификация частиц. Квантовые числа частиц и законы сохранения. Античастицы. Возбужденные состояния адронов. Резонансы. Странные частицы. Античастицы. Нейтральные частицы.	Лек	6	3	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.2	Электромагнитные взаимодействия.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.3	Сильные взаимодействия	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.4	Слабые взаимодействия.	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.5	Объединение взаимодействий	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.6	Современные астрофизические представления	Лек	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.7	Элементарные частицы. Взаимодействия элементарных частиц	Пр	6	2	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.8	Нуклеосинтез и Вселенная	Ср	6	15	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
4.9	Экспериментальные методы в физике высоких энергий. Ускорители. Встречные пучки. Пучки вторичных частиц. Детекторы. Реакции с частицами. Взаимодействия и распады частиц	Ср	6	7	Л1.1 Л1.2 Л1.3	
	Раздел 5. Контроль					
5.1	Экзамен	Экзамен	6	27	Л1.1 Л1.2 Л1.3	

Образовательные технологии

Классическая лекция, решение групповых и индивидуальных задач.

Список образовательных технологий

1	Активное слушание
---	-------------------

8. ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

8.1. Оценочные материалы для проведения текущей аттестации

См. Приложение

8.2. Оценочные материалы для проведения промежуточной аттестации

см. приложение

8.3. Требования к рейтинг-контролю

Всего студент может получить 100 баллов = 60 баллов на модули + 40 баллов на экзамене

В каждом модуле студент может получить максимум 30 баллов, из них 20 баллов за текущую работу, а 10 баллов – за рейтинговый контроль.

Обучающемуся, набравшему 40–54 балла, при подведении итогов семестра (на последнем занятии по дисциплине) в рейтинговой ведомости учета успеваемости и зачетной книжке может быть выставлена оценка «удовлетворительно».

Обучающемуся, набравшему 55–57 баллов, при подведении итогов семестра (на последнем занятии по дисциплине) в графе рейтинговой ведомости учета успеваемости «Премияльные баллы» может быть добавлено 15 баллов и выставлена экзаменационная оценка «хорошо».

Обучающемуся, набравшему 58–60 баллов, при подведении итогов семестра (на последнем занятии по дисциплине) в графе рейтинговой ведомости учета успеваемости «Премияльные баллы» может быть добавлено 27 баллов и выставлена экзаменационная оценка «отлично».

Обучающийся, набравший до 39 баллов включительно, сдает экзамен.

9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

9.1. Рекомендуемая литература

9.1.1. Основная литература

Шифр	Литература
Л1.1	Савельев И. В., Курс общей физики. В 3-х тт. Том 3. Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц, Санкт-Петербург: Лань, 2023, ISBN: 978-5-507-47045-7, URL: https://e.lanbook.com/book/322505
Л1.2	Капитонов И. М., Введение в физику ядра и частиц, Москва: Физматлит, 2010, ISBN: 978-5-9221-1250-5, URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=75503
Л1.3	Сивухин Д. В., Общий курс физики, Москва: Физматлит, 2002, ISBN: 5-9221-0230-3, URL: https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=82991

9.3.1 Перечень программного обеспечения

1	Adobe Acrobat Reader
---	----------------------

2	WinDjView
3	Kaspersky Endpoint Security 10 для Windows
4	Google Chrome
5	OpenOffice

9.3.2 Современные профессиональные базы данных и информационные справочные системы

1	ЭБС «ZNANIUM.COM»
2	ЭБС «ЮРАИТ»
3	ЭБС «Университетская библиотека онлайн»
4	ЭБС «Лань»

10. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Аудит-я	Оборудование
3-2026	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, переносной мультимедийный проектор, экран
3-218	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран
3-228	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран
3-226	комплект учебной мебели, Микшерный пульт, Аудиокомплект, Интерактивная система, проектор, Телекоммуникационные шкафы, экран, компьютер
3-227	комплект учебной мебели, переносной ноутбук, проектор, экран

11. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ОБУЧАЮЩИХСЯ ПО ОСВОЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

См. Приложение

Для проведения текущей и промежуточной аттестации:

Задание:

Решить задачу: Во сколько раз число распадов ядер радиоактивного иода ^{131}I в течение первых суток больше числа распадов в течение вторых суток? Период полураспада изотопа ^{131}I равен 193 часам.

Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

- **Высокий уровень (3 балла):** Понимает физику явления, составляет математические выражения для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Средний уровень (2 балла):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Низкий уровень (1 балл):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Из-за алгебраической неточности не получает правильный ответ.

Задание:

Решите задачу: Определить в лабораторной системе координат кинетическую энергию ядра ^9_4Be , образующегося при пороговом значении энергии нейтрона в реакции $^{12}_6\text{C}(n, \alpha)^9_4\text{Be}$.

Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

- **Высокий уровень (3 балла):** Понимает физику явления, составляет математические выражения для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Средний уровень (2 балла):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Получает правильный ответ.

- **Низкий уровень (1 балл):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Из-за алгебраической неточности не получает правильный ответ.

Задание:

1. Решить задачу: Вычислить удельную энергию связи для ядра ^{12}C

2. Решите задачу: Определить кинетические энергии α -частицы и конечного ядра при α -распаде ${}_{83}^{212}\text{Bi} \rightarrow {}_{81}^{208}\text{Tl} + \alpha$.

Способ аттестации: письменный

Критерии оценки:

- **Высокий уровень (3 балла):** Понимает физику явления, составляет математические выражения для получения решения. Получает правильный ответ.
- **Средний уровень (2 балла):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Получает правильный ответ.
- **Низкий уровень (1 балл):** Понимает физику явления. Испытывает сложности с составлением математических выражений для получения решения. Из-за алгебраической неточности не получает правильный ответ.

Методические материалы для обучающихся по освоению дисциплины

- *планы практических (семинарских) занятий.*
- *сборники задач.*
- *методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.*
- *требования к рейтинг-контролю*
- **планы практических (семинарских) занятий:**

Семинар 1: Решение задач на тему «Рассеяние элементарных частиц и размеры атомных ядер». Примеры задач:

1. Альфа-частицы с кинетической энергией $T = 6.5 \text{ МэВ}$ испытывают резерфордское рассеяние на ядре золота ${}^{197}\text{Au}$. Определить: 1) параметр столкновения b для альфа-частиц, наблюдаемых под углом $\theta = 90^\circ$; 2) минимальное расстояние $r_{\min}$ сближения альфа-частиц с ядром; 3) кинетическую (T') и 4) потенциальную (E') энергии альфа-частиц в этой точке.
2. Протон с кинетической энергией $T = 2 \text{ МэВ}$ налетает на неподвижное ядро ${}^{197}\text{Au}$. Определить дифференциальное сечение рассеяния $d\sigma/d\Omega$ на угол $\theta = 60^\circ$. Как изменится величина дифференциального сечения рассеяния, если в качестве рассеивающего ядра выбрать ${}^{27}\text{Al}$?

3. Вычислить сечение рассеяния α -частицы с кинетической энергией $T = 5$ МэВ кулоновским полем ядра ^{208}Pb под углами больше 90° .

Семинар 2: Решение задач на тему «Энергия связи ядер. Капельная модель ядра».

Примеры задач:

1. Вычислить удельную энергию связи для ядра ^{12}C .
2. Найти энергии отделения нейтрона и протона от ядра ^{12}C .
3. Найти энергию отделения альфа-частицы от ^{12}C .

Семинар 3: Решение задач на тему «Квантовые характеристики ядерных состояний». Примеры задач:

1. Определить спины и четности основных состояний изотопов кислорода ^{15}O – ^{18}O . Ответ: $1/2^-$, 0^+ , $5/2^+$, 0^+ .
2. Определить спины и четности основных состояний ядер $^{39}_{19}\text{K}$ и $^{41}_{20}\text{Ca}$. Ответ: $3/2^+$ и $7/2^-$ соответственно.
3. Предсказать магнитный момент ядра $^{41}_{21}\text{Sc}$ в основном состоянии, опираясь на одночастичную модель оболочек. Ответ: $+5,79\mu_N$
4. Предсказать магнитный момент ядра $^{13}_6\text{C}$ в основном состоянии, опираясь на одночастичную модель оболочек. Ответ: $+0,64\mu_N$

Семинар 4: Решение задач на тему «Радиоактивность». Примеры задач:

1. Активность препарата ^{32}P равна 2 мкКи. Сколько весит такой препарат? период полураспада равен 14,5 суток.
2. В результате α -распада радий ^{226}Ra превращается в радон ^{222}Rn . Какой объем радона при нормальных условиях будет находиться в равновесии с 1 г радия? Период полураспада ^{226}Ra $T_{1/2}(\text{Ra}) = 1600$ лет, ^{222}Rn - $T_{1/2}(\text{Rn}) = 3,82$ дня.
3. Удельное содержание изотопа ^{14}C , усвоенного деревом при его жизни, затем уменьшается вследствие β -распада с периодом полураспада 5700 лет. Определить возраст деревянного предмета, обнаруженного при раскопках, если удельная активность ^{14}C этого предмета составляет 0,1 от удельной активности свежесрубленного дерева.
4. Используя формулу Вайцеккера, оценить, начиная с какого массового числа становится энергетически возможным α -распад. Ответ: $A > 150$.

5. Оценить период полураспада радиоактивного ядра, испускающего α -частицы с энергией 1 МэВ, если ядро ${}^{232}_{90}\text{Th}$ имеет период полураспада $T = 1.4 \cdot 10^{10}$ лет и испускает α -частицы с энергией 4 МэВ, а для ядра ${}^{212}_{84}\text{Po}$ период полураспада $T = 3 \cdot 10^{-7}$ с и $E_{\alpha} = 8,8$ МэВ. Ответ: $T = 3.2 \cdot 10^{84}$ лет.

Семинар 5: Решение задач на тему «Деление ядер. Ядерные реакции». Примеры задач:

1. С помощью формулы Вейцеккера

- Вычислите энергию, высвобождаемую при делении ядра ${}^{238}\text{U}$ на два одинаковых осколка.
- Найдите критическое значение Z^2/A , при котором становится энергетически возможным деление ядра на два одинаковых осколка.

2. Возможны ли реакции:

- $\alpha + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^{10}\text{B} + n$;
- $\alpha + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{N} + d$

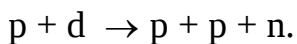
под действием α -частиц с кинетической энергией $T_{\alpha} = 10$ МэВ?

Ответ: 1. Возможна, 2) невозможна.

3. Вычислить порог реакции: ${}^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow {}^{17}\text{O} + p$, в двух случаях, если налетающей частицей является:

1) α -частица, 2) ядро ${}^{14}\text{N}$. Энергия реакции $Q = 1.18$ МэВ. Объяснить результат.

4. Определить, какую минимальную энергию должен иметь протон, чтобы стала возможной реакция



Семинар 6: Решение задач на тему «Элементарные частицы и их взаимодействие». Примеры задач:

1. Какая минимальная кинетическая энергия частиц каждого из сталкивающихся пучков $p\bar{p}$ – коллайдера необходима для протекания реакций: 1) $p + \bar{p} \rightarrow \bar{\Omega}^- + \Omega^-$; 2) $p + \bar{p} \rightarrow \bar{\Sigma}^0 + \Lambda$; 3) $p + \bar{p} \rightarrow \bar{\Lambda} + \Lambda$?

Энергии покоя частиц: $m_p c^2 = 938,27$ МэВ, $m_{\Omega^-} c^2 = 1672,43$ МэВ, $m_{\Sigma^0} c^2 = 1192,55$ МэВ, $m_{\Lambda} c^2 = 1115,63$ МэВ.

2. Найти, какие из самых тяжелых ядер и антиядер могут образоваться в реакции $p + p$ при соударении протона с энергией $E_p = 3 \cdot 10^{12} \text{ эВ}$ с неподвижным протоном и на встречных пучках протонов, ускоренных до такой же энергии.
3. Определить частицы X , образующиеся в следующих реакциях сильного взаимодействия: 1) $\pi^- + p \rightarrow K^- + p + X$; 2) $K^- + p \rightarrow \Omega^- + K^0 + X$; 3) $p + \bar{p} \rightarrow \Xi^- + \pi^+ + X$.
4. Могут ли следующие реакции: 1) $\pi^- + p \rightarrow K^- + \Xi^- + K^+$; 2) $\pi^+ + p \rightarrow \Delta^{++} + \pi^0$; 3) $K^+ + n \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$ происходить в результате сильного взаимодействия.

– сборники задач:

1. Сборник задач по общему курсу физики. Ч.3 Атомная и ядерная физика. Строение вещества./Под ред. В.А. Овчинкина. М.: Физматкнига, 2009.-512 с.
2. Савельев И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике. СПб.: Лань, 2005.-288с.
3. Иродов И.Е. Задачи по общей физике. М.: Бином, 2001. – 432с.
4. Сборник задач по общему курсу физики. В 5 т. Кн. V. Атомная физика. Физика ядра и элементарных частиц / Под ред. Д. В. Сивухина. М.: ФИЗМАТЛИТ; ЛАНЬ, 2006. - 184 с.

– методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов:

1. Изучить рекомендуемую литературу.
2. Просмотреть задачи, разобранные на аудиторных занятиях.
3. Разобрать задачи, рекомендованные преподавателем для самостоятельного решения, используя, при необходимости, примеры решения аналогичных задач.
4. Обсудить проблемы, возникшие при решении задач с преподавателем.

Требования к рейтинг-контролю. В течение семестра два раза (на модульных неделях) необходимо:

- 1) сдать преподавателю решения домашних задач, полученных из указанных сборников задач,

2) ответить на теоретические вопросы. Примеры вопросов (<http://nuclphys.sinp.msu.ru/misc/questions.htm>):

1. Состав и размер ядра. N-Z диаграмма атомных ядер.
2. Масса и энергия связи ядра. Формула Вайцеккера.
3. Радиоактивный распад ядер. Законы радиоактивного распада ядра.
4. Альфа-распад. Кулоновский и центробежный барьеры.
5. Бета-распад. Экспериментальное обнаружение (анти)нейтрино.
6. Гамма-переходы в ядрах. Электрические и магнитные гамма-переходы.
7. Дейтрон - связанное состояние нейтрона и протона.
8. Свойства нуклон-нуклонного взаимодействия.
9. Мезонная теория ядерных сил.
10. Ядерные реакции. Законы сохранения, кинематика.
11. Механизмы ядерных реакций. Прямые реакции. Составное ядро.
12. Деление ядер.
13. Модель ядерных оболочек.
14. Одночастичные и коллективные возбуждения ядер.
15. Фундаментальные частицы Стандартной модели
16. Законы сохранения в физике частиц.
17. Частицы и античастицы.
18. Резонансные частицы.
19. Электромагнитные взаимодействия. Структура нуклона.
20. Изоспин. Изоспиновые мультиплеты.
21. Странность. Рождение и распад странных частиц.
22. Сильные взаимодействия. Кварки. Глюоны. Цвет.
23. Кварковая структура адронов. Барионы. Мезоны.
24. Слабые взаимодействия. Промежуточные бозоны.
25. Слабые распады лептонов и кварков.
26. Пространственная инверсия. P-четность.
27. Зарядовое сопряжение. Зарядовая четность. CP-инверсия.
28. Обращение времени. CPT-теорема.
29. Фундаментальные взаимодействия. Объединение взаимодействий. Проблема неустойчивости протона.
30. Нуклеосинтез во Вселенной. Ядерные реакции в звездах.

Космические лучи. Состав и происхождение