

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования  
КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕДАГОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
им.В.П.Астафьева  
(КГПУ им.В.П.Астафьева)

Институт математики, физики и информатики  
Выпускающая кафедра физики и методики обучения физике

**Ашурбаева Дилафза Кахраманбековна**  
**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**

Разработка элективного курса для учащихся старших классов по теме  
«Стохастическое ускорение»

Направление подготовки 44.03.05 Педагогическое образование  
Профиль Физика и информатика

ДОПУСКАЮ К ЗАЩИТЕ  
Зав.кафедрой физики и  
методики преподавания физике,  
д.п.н., профессор  
В.И.Тесленко  
«13» июня 2017



Руководитель  
д.ф.-м.н., профессор кафедры  
физики и  
методики обучения физике  
В. М. Логинов

Дата защиты «26» июня 2017

Обучающийся Ашурбаева Д.К.  
«26» июня 2017  
Оценка отлично

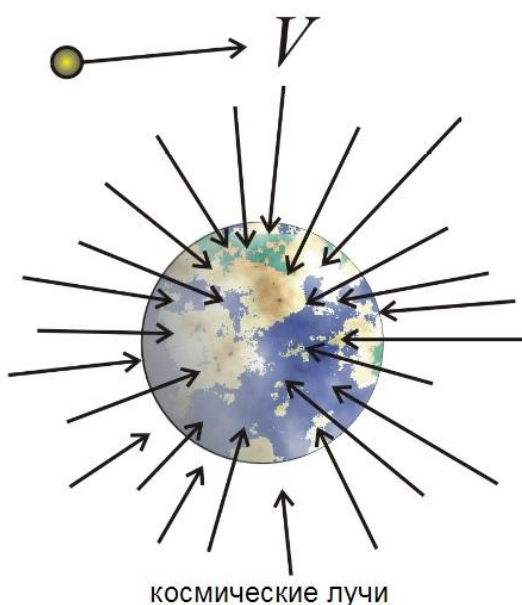
Красноярск  
2017

## Оглавление

Введение.....	3
Глава I. Элективные курсы в предпрофильной и профильной подготовке учащихся .....	7
1.1. Типология элективных курсов и их роль в организации профильного и предпрофильного обучения .....	7
1.2. Цель элективных курсов .....	12
1.3. Правила оформления программ .....	14
1.4 Критерии оценки программы элективного курса.....	16
1.5. Психолого-педагогические требования к разработке элективных курсов .....	17
Глава II. Элективный курс для учащихся старших классов по теме «Стохастическое ускорение» .....	21
2.1. Пояснительная записка .....	21
2.2. Тематическое планирование курса .....	25
2.3. Содержание курса .....	26
2.4. Методические рекомендации .....	63
2.5. Список литературы .....	64
Заключение .....	65
Список использованной литературы и источников.....	67
Приложение А .....	69

## Введение

Космические лучи - потоки высокоэнергичных заряженных частиц, приходящих на Землю из космического пространства, - представляют собой одну из величайших загадок природы. Учёные до сих пор не могут уверенно объяснить, откуда в космосе берутся частицы таких колоссальных энергий, что их достижение проблематично даже для современных мощнейших ускорителей. Космические лучи рождают вспышки сверхновых, частицы ускоряются облаками межзвёздного газа и т.д. Высокоэнергичные частицы космического излучения издавна сравнивали с частицами, получаемыми в ускорителях [3].



С помощью космических лучей физики открыли множество разных интересных частиц, которых на Земле тогда не знали. Сейчас их научились получать на ускорителях [4].

Основная загадка здесь, конечно, состоит в том, откуда они берутся. Даже самый мощный ускоритель, который у нас сейчас есть, — Большой адронный коллайдер — близко не подбирается к этим энергиям.

Какие же экзотические объекты во Вселенной представляют собой такие ультрабольшие адронные ускорители? На сегодняшний день однозначного ответа на этот вопрос нет. Это вопрос одновременно и к физике космических лучей, и к астрофизике, так как, чтобы разобраться в

этом, можно попытаться смотреть, откуда они прилетают. Но это невозможно определить, они прилетают из совершенно произвольных направлений, не указывая на какие-либо источники. Это является загадкой.

С другой стороны, астрофизический анализ показывает, что ни один из известных астрофизических объектов гарантированно в качестве такого ускорителя работать не может.

Что еще интересного могут нам дать эти частицы сверхвысоких энергий? Оказывается, что можно пытаться использовать их для целей не только астрофизики. Откуда они берутся и как устроены объекты, их ускоряющие, — это астрофизическая задача. А есть задачи, которые полностью связаны с физикой элементарных частиц, потому что, когда такая ускоренная частица сталкивается с каким-то веществом в атмосфере Земли, она взаимодействует с каким-то атомом, с ядром, и энергия в системе отсчета центра масс примерно раз в 30 превышает энергию столкновений протонов в Большом адронном коллайдере. Поэтому если мы сможем изучить эти столкновения, то у нас получится продвинуться в понимании взаимодействия частиц очень далеко, куда мы, во всяком случае, в обозримом будущем в земных экспериментах не сможем зайти [5].

**Актуальность исследования:** исследование процессов ускорения космических лучей представляет интерес, главным образом, по двум причинам. Во-первых, свойства ускоренных частиц несут сведения о явлениях, протекающих в среде, и величинах параметров в области их ускорения. Во-вторых, ускоренные частицы часто сами являются активным компонентом, существенно влияющим на динамические процессы плазмы в космосе.

**Цель дипломного исследования:** осуществление профильной ориентации учащихся с помощью элективного курса «Стохастическое ускорение».

**Реализация поставленной цели потребовала решения ряда конкретных задач:**

1. Проанализировать научно-методическую литературу и требования по разработке элективных курсов;
2. Провести анализ учебной и научной литературы по теме «Стохастическое ускорение».
3. Рассмотреть основные механизмы стохастического ускорения заряженных частиц;
4. Обзор программного продукта открытого типа Scilab для моделирования;
5. Разработать элективный курс по теме: «Стохастическое ускорение».

***Решение поставленных задач потребовало привлечение следующих методов исследования:***

1. структурно-логический анализ и систематизация научного материала;
2. конструирование учебного материала.

***Практическая значимость исследования*** заключается в том, что: Разработан элективный курс по физике на тему «Стохастическое ускорение», который можно рекомендовать в качестве профильного обучения в школе и использовать в моей педагогической деятельности.

***Проблема исследования*** : одна из проблем профилизации старших классов большинства общеобразовательных школ во многих случаях – недостаточное число учащихся для комплектования профильных классов. Можно ли удовлетворить запросы учащихся, собирающихся продолжить обучение в ВУЗах и нуждающихся в изучении физики на повышенном уровне? Можно с помощью элективных курсов, дополняющих базовый уровень программы.

***Объект исследования:*** процесс обучения физике в старшей школе.

***Предмет исследования:*** процесс профильного обучения учащихся в рамках элективного курса.

*Гипотеза исследования* заключается в том, что учитель в процессе проведения элективного курса «Стохастическое ускорение» сможет вызвать интерес учащихся к предмету и профессионально сориентировать подростков.

*Научная новизна дипломного исследования* заключается, как это следует из анализа литературы, в отсутствии аналогичных элективных курсов по данной теме.

Дипломная работа состоит из введения, двух глав, заключения, списка литературы и Приложения.

В первой главе рассмотрена типология элективных курсов и их роль в организации профильного и предпрофильного обучения, цели элективных курсов, правила оформления, критерии оценки программы и психолого - педагогические требования к разработке.

Во второй главе представлена программа элективного курса «Стохастическое ускорение», тематическое планирование по данному курсу, школьная лекция на тему «Механизмы ускорения Ферми», практические работы, обзор программного продукта открытого типа Scilab для моделирования, также план проведения экскурсии в город Железногорск (Горно-химический комбинат и «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва»).

В заключении приведены основные выводы и результаты дипломной работы.

Список литературы содержит 17 наименований.

## **Глава I. Элективные курсы в предпрофильной и профильной подготовке учащихся**

### **1.1. Типология элективных курсов и их роль в организации профильного и предпрофильного обучения**

В концепции профильного обучения на старшей ступени общего образования, утвержденной приказом Министерства образования России от 18.07.02 № 2783, сформулированы цели профильного обучения, среди которых — создание условий для дифференциации содержания обучения старшеклассников с широкими и гибкими возможностями построения школьниками индивидуальных образовательных программ. Для реализации этой цели необходимо использовать модель дифференциации обучения, при которой профильность достигается за счет различных комбинаций следующих учебных курсов:

- *базовые общеобразовательные предметы* являются обязательными для всех учащихся во всех профилях обучения. Их число не должно быть чрезмерно большим (не более 7), но в тоже время это должен быть функционально полный набор.

Концепцией профильного обучения предлагается следующий набор обязательных общеобразовательных курсов: русский язык, литература, иностранный язык, математика, история, физкультура, а также интегрированные курсы обществоведения (для естественно-математического, технологического и иных возможных профилей), естествознания (для гуманитарного, социально-экономического и иных возможных профилей).

- *профильные общеобразовательные курсы* – это курсы повышенного уровня, призванные углублять в старшей школе базовые общеобразовательные предметы и определяющие направленность каждого конкретного профиля обучения. При этом на профильном уровне базовые предметы могут быть представлены совокупностью отдельных профильных курсов.

- *элективные курсы* – обязательные курсы по выбору учащихся, входящие в состав профиля обучения на старшей ступени школы. В первую очередь - это занятия по выбору, позволяющие школьникам развить интерес к тому или иному предмету и определить свои профессиональные пристрастия.

Новый элемент учебного плана — элективные курсы. В зависимости от состава «комплекта» этих курсов может работать та или иная модель организации профильного обучения.

Элективные курсы это новейший механизм актуализации и индивидуализации процесса обучения. С хорошо разработанной системой элективных курсов каждый ученик может получить образование с определенным желаемым уклоном в ту или иную область знаний.

Примерное соотношение объемов базовых предметов, профильных и элективных курсов может быть 50%, 30%, 20% от общего числа часов учебного плана [2].

Набор профильных и элективных курсов на основе базовых общеобразовательных предметов составит индивидуальную образовательную «траекторию» для каждого школьника.

Элективные курсы реализуются за счет школьного компонента образования и могут выполнять несколько функций:

- дополнять содержание профильного курса;
- развивать содержание одного из базовых курсов;
- удовлетворять разнообразные познавательные интересы школьников, выходящие за рамки выбранного ими профиля.

Элективные курсы могут выполнить еще одну важную функцию — стать «полигоном» для создания и экспериментальной проверки нового поколения учебных материалов. Так как курсы должны соответствовать запросам учащихся, которые их выбирают, появляется возможность на примере учебных пособий для элективных курсов отработать условия реализации мотивационной функции учебника.



В целях ориентации школьников на выбор профиля обучения на старшей ступени предусматривается проведение в IX классах основной школы предпрофильной подготовки. Для этого в базисном учебном плане выделяется 2 ч в неделю (68 ч в год) на специально организованные краткосрочные (от месяца до полугодия) курсы. Их цель — самоопределение учеников относительно профиля обучения в старших классах [11].

В течение учебного года ученик может прослушать 8 разных видов курсов (при их месячной продолжительности), 4 вида курсов (длительностью в одну учебную четверть) или 2 вида курсов (при их продолжительности в одно учебное полугодие).

Можно условно выделить следующие *типы предпрофильных элективных курсов*:

—Предметные курсы. Повышают уровень изучения конкретной учебной дисциплины, подготавливая школьников к профильному уровню учебного предмета. Например, «Влияние факторов среды на системы органов».

—Курсы, ориентирующие на выбор профиля обучения. Знакомство с видами профессиональной деятельности и разными формами организации познавательной деятельности, характерными для данной дисциплины. Например, «Проектная деятельность. Культура здоровья».

*Профильные элективные курсы классифицируются следующим образом:*

—Предметные курсы. Предполагают повышенный уровень изучения профильного предмета в профильном классе. Например, «Современные достижения физики».

—Курсы, поддерживающие базовый учебный предмет, помогающие в подготовке к экзамену по этому предмету на повышенном уровне. Например, «Основные алгоритмы решения задач по молекулярной физике».

—Межпредметные курсы. Опора на межпредметные связи, т.е. возможность изучать два предмета на профильном уровне. Например, «Имитационное моделирование физических систем».

—Курсы, освещающие области деятельности, выходящие за рамки традиционных школьных предметов.

—Курсы с ориентацией на приобретение школьниками образовательных результатов для успешного продвижения на рынке труда.

*Элективные курсы по физике можно разделить на несколько групп:*

1. Элективные курсы повышенного уровня, направленные на углубленное изучение физики, имеющие как тематическое, так и временное согласование с профильным курсом физики. Выбор такого элективного курса позволит изучить физику на углубленном уровне.

2. Элективные спецкурсы, в которых углубленно изучаются отдельные разделы основного курса физики. Примерами таких курсов могут быть: «Механика», «Строение и свойства вещества», «Термодинамика», «Волновая оптика», «Специальная теория относительности», «Физика атома и атомного ядра» и др. Ясно, что в элективных курсах этого типа выбранная тема изучается более глубоко, чем при выборе курса повышенного уровня.

3. Элективные спецкурсы, в которых углубленно изучаются отдельные разделы основного курса, не входящие в обязательную программу курса физики. Примерами таких курсов могут быть: «Гидро- и аэродинамика», «Уравнения Максвелла», «Физика плазмы», «Элементы квантовой механики» и др.

4. Прикладные элективные курсы, цель которых — знакомство учащихся с важнейшими путями и методами применения знаний по физике на практике, развитие интереса учащихся к современной технике и производству. Приведем возможные примеры таких курсов: «Физика и компьютер», «Курс прикладной физики с изучением основ механизации производства», «Курс прикладной физики на материале автоматике», «Курс прикладной физики на материале сельскохозяйственного производства», «Техника и окружающая среда» и др.

5. Элективные курсы изучения физических методов познания природы. Примерами таких курсов могут быть: «Измерения физических величин»,

«Фундаментальные эксперименты в физической науке», «Школьный физический практикум: наблюдение эксперимент, моделирование», «Методы физико-технических исследований», «Как делаются открытия в физике», «Физико-техническое моделирование» и т.д.

6. Элективные курсы по истории физики и астрономии.

7. Элективные курсы по решению физических задач, в том числе составлению и решению задач на основе физического эксперимента [17].

К элективным курсам предъявляются особые требования, направленные на активизацию самостоятельной деятельности учащихся, что реально возможно, поскольку эти курсы не связаны рамками образовательных стандартов и какими-либо экзаменационными материалами.

При работе в условиях профильной школы нельзя забывать о главной задаче российской образовательной политики — обеспечение современного качества образования на основе сохранения его фундаментальности и соответствия актуальным и перспективным потребностям личности, общества и государства.

Таким образом, современная школа не должна отказываться от цели приобретения учениками знаний, умений, навыков (ЗУНов), но должна считать приоритетным направлением деятельности — развитие школьников, обучение их решению учебных и жизненных проблем, умению учиться.

Элективные курсы связаны с приобретением учащимися общеучебных умений (например, с освоением способов анализа информации, приемов конструирования сообщения, способов совместной деятельности, решения проблем и т.д.).

Возможна адаптация наиболее удачных существующих курсов по выбору в различных странах мира к условиям России. С этой целью необходимо изучить опыт проведения элективных курсов в развитых странах и отобрать пособия, получившие широкое распространение.

Полезно также опираться на 30-летний опыт существования системы факультативных занятий в СССР. Тогда были созданы десятки программ

разных факультативных курсов и, хотя не все из них стали массовыми, среди них было много весьма достойных, к тому же обеспеченных учебными пособиями для учащихся и методическими пособиями для учителей.

При изучении элективных курсов появляется возможность реализовать современную тенденцию, заключающуюся в том, что усвоение предметного содержания из цели образования превращается в средство такого эмоционального, социального и интеллектуального развития ребенка, которое обеспечивает переход от обучения к самообразованию.

## **1.2. Цель элективных курсов**

Цель элективных курсов в предпрофильной подготовке и профильном обучении — индивидуализация обучения, подготовка учащихся к осознанному и ответственному выбору сферы будущей профессиональной деятельности. Основной целью элективных курсов в предпрофильной подготовке является ориентация учащихся на выбор профиля в соответствии с интересами, склонностями и способностями.

Базовый курс физики, изучаемый в основной школе, значительно отличается от профильного курса физики. Поэтому содержание и форма организации занятий в рамках курсов по выбору должны быть направлены на создание особой учебной среды, которая бы отражала специфику изучения предмета на более высоком уровне в старшей профильной школе. Иными словами на занятиях элективного курса ученик должен попробовать себя в специфических видах деятельности, присущих физике (планирование, проведение эксперимента и обработка полученных результатов, решение более сложных расчетных, экспериментальных и качественных задач). После осуществления данной пробы школьник должен ответить на вопросы: «Хочу ли я изучать физику как профильный предмет?», «Могу ли я изучать физику на более высоком уровне?», «Каких умений и навыков мне не хватает, для того, чтобы изучать физику на профильном уровне?», «Где бы я хотел получать профильное образование по физике?» и т.д.

Таким образом, элективные курсы в предпрофильной подготовке решают следующие задачи:

- удовлетворение познавательных интересов школьников;
- проба специфических видов деятельности, присущих определенному предмету или образовательной области;
- оценка учащимися своих способностей и возможностей.

Содержание курсов по выбору, с одной стороны, должно соответствовать возрастным особенностям и познавательным возможностям девятиклассников, с другой стороны — оно должно развивать положительную учебную мотивацию учеников, предоставляя учащимся опыт работы на уровне повышенных предметных требований.

Содержание элективных курсов по физике выходит за рамки федерального стандарта образования, поэтому вопросы, рассматриваемые в курсах по выбору, могут быть самыми разнообразными. По содержанию их можно разделить на два типа: предметные и межпредметные (интегрированные, ориентационные). При создании элективных курсов педагог должен ответить на следующие вопросы, какое содержание и какие организационные формы позволят наиболее полно реализовать задачи предпрофильной подготовки. В курс могут быть включены предметные вопросы, которые отсутствуют в базовых общеобразовательных курсах, представлены в недостаточном объеме или же недостаточно хорошо отрабатываются из-за дефицита учебного времени. Такой элективный курс, кроме ориентационной функции, выполняет компенсирующую функцию. Но, тем не менее, даже такие курсы не должны дублировать базовые. Они должны содержать новый для учащихся материал или же новые виды и способы деятельности с предметным содержанием. Межпредметные курсы посвящаются, как правило, изучению ключевых проблем современности, способам их решения в различных профессиональных областях.

Самое главное требование, предъявляемое к содержанию курсов по выбору в предпрофильной подготовке — это ориентирующий характер,

оригинальность и новизна для учащихся. Кроме того, содержание курсов не должно быть очень большим (до 34 час), так как в предпрофильной подготовке ученик должен пройти несколько разных элективных курсов, чтобы сделать адекватный выбор профиля обучения.

Содержание курса должно отвечать принципам модульности, чтобы его можно было изучать как отдельный курс или как составную часть большого цикла, состоящего из отдельных модулей.

Самое главное требование, предъявляемое к содержанию курсов по выбору — это ориентирующий характер, оригинальность и новизна для учащихся [13].

### **1.3. Правила оформления программ**

Структура программы элективного курса

*Программа элективного курса должна содержать следующие структурные элементы:*

- титульный лист;
- пояснительную записку;
- учебно-тематический план;
- содержание изучаемого курса;
- методические рекомендации;
- список литературы для учителей и учащихся;
- приложения.

Оформление структурных элементов программы

*Титульный лист включает:*

- наименование образовательного учреждения;
- сведения о том, где, когда и кем утверждена программа;
- название элективного курса;
- класс, на который рассчитана программа;
- ФИО и должность автора (авторов) программы;
- название города, населенного пункта;
- год разработки программы.

*Пояснительная записка должна содержать:*

- вид/тип элективного курса;
- аннотация, обоснование необходимости введения данного курса в школе;
- указание на место и роль курса в профильном обучении. Важно показать, каково место курса в соотношении как с общеобразовательным, так и с базовыми профильными предметами: какие межпредметные связи реализуются при его изучении, какие общеучебные и профильные умения и навыки при этом развиваются, каким образом создаются условия для активизации познавательного интереса учащихся, профессионального самоопределения;
- цель и задачи элективного курса (цель - для чего он изучается, какие потребности учащихся и учителей он удовлетворяет; задачи курса - что необходимо для достижения целей);
- сроки реализации программы (продолжительность обучения, этапы);
- основные принципы отбора и структурирования материала;
- методы и формы обучения, режим занятий (результат изучения элективного курса – это ответ на вопрос: какие знания, умения и навыки будут получены, какие виды деятельности будут освоены, какие ценности будут предложены для усвоения);
- предполагаемые результаты;
- сведения об апробации программы (если программа или ее элементы уже апробированы в учебном процессе)
- инструментарий для оценивания результатов.

*Учебно-тематический план включает:*

- перечень разделов и тем;
- количество часов на изучение каждой темы;
- вид занятий.

*Содержание изучаемого курса содержит перечень тем и их реферативное описание.*

*Методические рекомендации включают:*

- основные содержательные компоненты по каждому разделу или теме;
- описание приемов и средств организации учебно-воспитательного процесса, форм проведения занятий;
- дидактические материалы.

*Литература включает* список литературы, а также других видов учебно-методических материалов и пособий, необходимых для изучения курса, как для учителя, так и для учащихся.

*Приложение содержит:*

- темы творческих работ, проектов;
- планы проведения экскурсий;
- описание лабораторных работ и т. д [2].

#### **1.4 Критерии оценки программы элективного курса**

1. Степень новизны для учащихся – программа включает материал, не содержащийся в базовых программах.
2. Мотивирующий потенциал программы – программа имеет содержание, вызывающее интерес у учащихся.
3. Развивающий потенциал (способствует ли программа интеллектуальному, практическому, творческому и эмоциональному развитию школьников).
4. Полнота и завершенность содержательных линий программы в соответствии с поставленными целями.
5. Связность и систематичность изложенного материала – содержание построено таким образом, что изучение всех последующих тем обеспечивается предыдущими или знаниями базовых курсов; между частными и общими занятиями прослеживаются связи.
6. Методы обучения – программа основывается на методах активного обучения (проектных, исследовательских, игровых и т. д.).
7. Степень контролируемости – в программе конкретно определены ожидаемые результаты обучения и методы проверки их достижимости.



8. Реалистичность с точки зрения ресурсов – программа реалистична с точки зрения использования учебно-методических и материально-технических средств, кадровых возможностей школы.

9. Формальная структура программы – наличие в программе необходимых разделов: пояснительной записки, основного (тематического) содержания, ожидаемых результатов обучения, списка литературы [11].

### **1.5. Психолого-педагогические требования к разработке элективных курсов**

Требования к учебным изданиям для профильного обучения направлены на реализацию лично ориентированного подхода к обучению и воспитанию, на создание условий для самообразования и творческой работы учащихся. Сформулируем основные требования, которыми следует руководствоваться при разработке элективных курсов.

В основу разработки курса должны быть положены принципы, соответствующие логике отбора и реализации содержания лично ориентированного образования. Это:

1. систематизация, выделение «базового ядра» информации из той или иной области профессиональной деятельности, содержание которой подлежит дидактической трансформации;
2. целеполагание, создание целевого проекта;
3. трансформация содержания профессиональной деятельности в дидактические объекты;
4. проектирование технологии изучения курса;
5. инструментализация, оформление отобранного содержания и технологии его освоения в виде программ, учебных и методических изданий.

Место курса в образовательном процессе.

При разработке содержания и учебно-методической системы элективного курса необходимо четко обозначить место курса в соотношении с общеобразовательными и базовыми профильными предметами. Важно показать, какие межпредметные связи реализуются при изучении

элективного курса, какие общеучебные, профильные и специальные (физические) умения и навыки при этом развиваются, каким образом создаются условия для активизации познавательного интереса учащихся, профессионального самоопределения.

Цели и задачи изучения курса желательно формулировать в терминах, понятных и учителю, и учащимся. В целях указывается, для чего изучается курс, какие образовательные потребности он удовлетворяет. В соответствии с целями ставятся задачи изучения курса: что необходимо для достижения целей, над чем конкретно предстоит работать и учителю и учащимся при изучении курса.

Отбор содержания элективного курса должен осуществляться на основе как морфологического, так и функционального анализа. В ходе морфологического анализа выясняется взаимосвязь предметного содержания элективного курса и содержания базовых и профильных курсов с культуроведческой, компетентностной, научной и профессиональной точек зрения. Функциональный анализ определяет функции учебного содержания: описание изучаемых объектов, процессов и явлений, их качественное объяснение; осмысление, как на теоретическом, так и на уровне практического преобразования действительности.

Таким образом, при отборе содержания решаются следующие вопросы: какие факты, понятия, представления, идеи, принципы и ценности должны предлагаться для раскрытия и усвоения учебного предмета; какие умения и навыки, методы и виды деятельности, а также опыт их освоения будут сформированы; для каких физических профессий (прикладных областей физики) полезны формируемые умения и навыки; какие разделы и из каких школьных курсов должны быть освоены (как учащимися, так и учителем) предварительно, перед началом изучения элективного курса; в виде каких материалов реализуется содержание курса (учебное пособие, рабочая тетрадь для учащихся, методическое пособие для учителя, хрестоматия, электронные и мультимедийные пособия, Интернет – ресурсы и т. п.).

Методы и формы обучения должны определяться требованиями профилизации обучения, учета индивидуальных особенностей учащихся, развития и саморазвития личности. Ведущее место в профильном обучении следует отвести методам проблемного, практического и исследовательского характера, стимулирующим познавательную активность учащихся. Это дискуссии, эксперименты, учебные проекты, работа в творческих мастерских. Значительной должна быть доля самостоятельной работы с различными источниками учебной информации.

При определении форм организации учебных занятий следует исходить прежде всего из специфических целей курса. Поскольку, в принципе, не исключается изучение элективного курса даже одним учащимся, необходимо предусмотреть варианты изучения как в коллективных, так и в индивидуально – групповых формах. Важно предусмотреть использование таких методов и форм обучения, которые давали бы представление учащимся об условиях и процессах будущей профессиональной деятельности в соответствии с выбранным профилем обучения, т. е. в какой – то степени моделировать эти процессы.

Тематический план включает в себя основное содержание всех разделов и тем курса с распределением учебного времени. Отдельно выделяются практические и лабораторные работы, экскурсии, работа над учебными проектами и др. [17].

Подбираются дополнительные обучающие материалы: литература для учителя и для учащихся (основная и дополнительная), электронные издания (компакт – диски, обучающие компьютерные программы), Интернет – ресурсы.

Важным элементом методического обеспечения элективного курса является определение ожидаемых результатов изучения курса, а также способов их диагностики и оценки. Ожидаемый результат изучения курса – это ответ на вопрос: какие знания, умения, опыт, необходимые для построения индивидуальной образовательной траектории в школе и

последующей профессиональной деятельности, будут получены, какие виды деятельности будут освоены и какие ценности будут предложены для усвоения? Результаты должны быть значимы в первую очередь для самих учащихся, что необходимо для обеспечения привлекательности курса на этапе первоначального знакомства с ним и его выбора школьниками.

Не менее важно продумать систему контроля уровня достижений учащихся и критерии оценки. Необходимо разработать формы промежуточного контроля и итоговой зачетной работы по курсу.

## Глава II. Элективный курс для учащихся старших классов по теме «Стохастическое ускорение»

### РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Элективного курса

«Стохастическое ускорение»

Учитель: \_\_\_\_\_  
(Ф.И.О.)

#### 2.1. Пояснительная записка

*Образовательная область:* Физика

*Возрастная группа:* 11 класс

*Вид элективного курса:* профильный

*Тип элективного курса:* элективные курсы, в которых углубленно изучаются отдельные разделы основного курса.

Исследование процессов ускорения заряженных частиц в космических условиях является одной из наиболее актуальных проблем современной астрофизики. В космической плазме происходят явления, приводящие к ускорению быстрых заряженных частиц с энергией намного превосходящей тепловую энергию. Присутствие быстрых частиц в различных областях межпланетного пространства подтверждено прямыми измерениями аппаратурой, вынесенной в космическую среду. Наличие большого количества релятивистских частиц в различных астрофизических объектах, таких как остатки сверхновых звезд, радиогалактики и других установлено методами радио -, рентгеновской и гамма — астрономии [3].

Исследование процессов ускорения космических лучей представляет интерес, главным образом, по двум причинам. Во-первых, свойства ускоренных частиц несут сведения о явлениях, протекающих в среде, и величинах параметров в области их ускорения. Во-вторых, ускоренные

частицы часто сами являются активным компонентом, существенно влияющим на динамические процессы плазмы [12,15].

Представляемый элективный курс может войти в состав физико-математического профиля обучения на старшей ступени школы и реализуется за счёт школьного компонента учебного плана. Курс отражает не только теоретические представления о механизмах ускорения заряженных частиц, но и иллюстрируют результаты прямых измерений в космическом пространстве, которые активно проводятся в настоящее время. Теоретическая часть курса составлена с учетом общепринятой научной интерпретации проблемы, что не исключает освещения спорных вопросов, не имеющих однозначного решения.

Курс базируется на концепции профильного обучения, он развивает интерес к физике и расширяет возможности социализации учащихся.

Программа курса имеет традиционное деление на рубрики: тема, ее содержание, время изучения, творческие задания, экскурсии, в конце приводится список литературы. Занятия могут проводиться в разнообразной форме, обобщающее занятие проводится в форме конференции. Также могут быть проведены экскурсии, при этом внимание обращается на выделение физических явлений.

Дети должны научиться самостоятельно, приобретать знания, критически оценивать полученную информацию, излагать свою точку зрения по изучаемому вопросу, выслушивать другие мнения и конструктивно обсуждать их. Поэтому ведущими занятиями являются семинар и практическое занятие, конечно, есть и лекционный курс. Темы семинаров даются заранее.

*Ожидаемыми результатами данного курса являются:*

- Получение представлений о порядках величин энергий частиц, которые прилетают из межзвездного пространства;

- Получение представлений об энергиях, которые можно получить, разогнав их на современных ускорителях;

·Получение представлений о физических механизмах стохастического ускорения;

·Приобретение опыта поиска информации по заданной теме; составления докладов, отчетности; навыков проектной деятельности и анализа полученных результатов;

·Развитие познавательных интересов, интеллектуальных и творческих способностей на основе самостоятельного приобретения новых знаний

·Умение сотрудничать с товарищами, работая в группе;

·Умение классифицировать и сравнивать понятия; устанавливать причинно-следственные связи; выявлять закономерности, объяснять явления, анализировать: физическую формулу, величину, явление, закон, формы материи, таблицы, графики, рисунки.

*Цели курса:*

*Образовательные*

Способствовать углублению знаний учащихся по разделам физики электромагнитных явлений, атомной и ядерной физики.

*Развивающие*

Развитие познавательного интереса в области физики сверхвысоких энергий;

Развитие индивидуальных творческих способностей обучающихся через моделирование физических явлений с использованием соответствующих компьютерных программ.

*Воспитательные*

Воспитание адекватной самооценки продукта своей деятельности.

*Задачи курса:*

·развитие критического мышления, познавательного интереса, интеллектуальных и творческих способностей учащихся в процессе самостоятельного приобретения знаний с использованием различных источников информации;

- определить порядки величин энергий частиц, которые прилетают из межзвездного пространства;

- определить энергии, которые можно получить, разогнав их на современных ускорителях;

- раскрыть основные физические механизмы стохастического ускорения заряженных частиц;

- воспитание навыков сотрудничества в процессе совместной работы;

- осознанный выбор профильного обучения;

- обзор программного продукта открытого типа Scilab для моделирования.

*Учебный процесс элективного курса предусматривает следующие методы и формы работы:*

- изложение нового материала учителем в форме лекции;

- дифференцированный подход на практических занятиях: для всех тем курса подобраны задания различного уровня сложности, которые в зависимости от уровня усвоения материала учащимися будут им предложены;

- самостоятельная работа с учебной литературой;

- индивидуальные консультации.

*Место курса в учебном плане:*

Программа элективного курса по физике «Стохастическое ускорение» — элективный курс для учащихся 11 классов. Курс предназначен для учащихся физико-математического профиля, рассчитан на 34 часа, состоит из 6-и тем, каждый из которых имеет логическое завершение и может быть использован как самостоятельный курс. Занятия планируется проводить 1 раз в неделю продолжительностью 1 час в течение всего учебного года или 2 раза в неделю продолжительностью 2 часа в течение одного полугодия.



## 2.2. Тематическое планирование курса

№ п/п	Тема	Всего часов	Лекции	Практика	Образовательный продукт
	Вводное занятие	2	1	1	Отчет об экскурсии
1.	Тема 1. «Механизмы ускорения Ферми»	6	6	-	Конспект
2.	Тема 2. «Турбулентное ускорение»	4	4	-	Конспект
3.	Тема 3. «Ускорение ударными волнами»	4	2	-	Конспект
4.	Тема 4. «Ускорение в солнечной плазме»	4	2	-	Конспект
5.	Тема 5. «Нагрев частиц»	6	4	2	Модель в Scilab, доклад
6.	Тема 6. «Механизмы ускорения заряженных частиц с помощью различных ускорителей»	6	4	2	Доклад, таблицы
7.	Зачетное занятие	2	2	-	
	<b>ВСЕГО:</b>	34	21	13	

## **2.3. Содержание курса**

### **Вводное занятие (2 ч.)**

На вводном занятии учащиеся знакомятся с программой курса, видами заданий, с формами и планируемым объемом работ, а также с необходимым набором материалов, которые нужно будет использовать при изучении курса. Также рассказывается о итоговом продукте-модели и учащиеся, по желанию, могут уже приступить к моделированию.

Динамические, гидродинамические и электромагнитные процессы ускорения. Заряженная частица. Бетатронный эффект. Экскурсия в город Железногорск (Горно-химический комбинат и «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва»).

Практическое занятие (1 ч.) Отчет об экскурсии на тему «Способы поддержания работоспособности спутникового оборудования в условиях жесткого космического излучения».

### **Тема 1. «Механизмы ускорения Ферми» (6 ч.)**

Механизм Ферми: первый вариант. Механизм Ферми. Вариант второй - ускорение частиц в сильных ударных волнах.

### **Тема 2. «Турбулентное ускорение» (4 ч.)**

Магнитогидродинамический генератор. Изотропизация. Стационарное изотропное распределение. Полиномы Лежандра. Максвелловский спектр.

### **Тема 3. «Ускорение ударными волнами» (4 ч.)**

Ускорение космических лучей межпланетными ударными волнами. Галактические космические лучи малых энергий. Космические лучи сверхновые.

### **Тема 4. «Ускорение в солнечной плазме» (4 ч.)**

Гелиомагнитосфера. Солнечный ветер. Гелиосфера. Ударная волна. Короткие области взаимодействия. Корональные извержения массы.

### **Тема 5. «Нагрев частиц» (6 ч.)**

Стохастичность и идеи нагрева и ускорения. Модель Улама.

Практическое занятие (2 ч.) Создание моделей физических явлений в программной среде Scilab (Приложение А).

### **Тема 6. «Механизмы ускорения заряженных частиц с помощью различных ускорителей» (6 ч.)**

Механизмы ускорения заряженных частиц с помощью различных ускорителей. История развития ускорительной техники. Классификация ускорителей. Принцип действия резонансных ускорителей. Основные типы современных ускорителей.

Практическое занятие (2ч.)

1. Заполнить таблицу «Крупнейшие линейные ускорители»

2. Заполнить таблицу «Крупнейшие циклические ускорители»

**Зачетное занятие (2 ч.)** Конференция

Отчет по всем практическим работам с пояснением полученных результатов. Подведение итогов.

#### **Вводное занятие**

Ускорительные процессы можно разделить на динамические, гидродинамические и электромагнитные. Строгого различия между ними нет, поскольку космические лучи как заряженные частицы неразрывно связаны электрическими и магнитными полями. Однако в некоторых моделях ускорение является чисто динамическим, поскольку происходит в результате столкновений, которые можно описывать с помощью простых динамических рассуждений. Гидродинамические модели предполагают ускорение всего слоя плазмы до ультрарелятивистских скоростей. Электромагнитные процессы ускорения частиц действуют в лабораторных экспериментах, но могут проявляться в несколько измененном виде и в астрофизических условиях [1].

Остановимся кратко на некоторых основных аспектах электромагнитных процессов. Общее выражение для ускорения заряженной частицы имеет вид

$$\frac{d(\gamma m \mathbf{V})}{dt} = e(\mathbf{E} + \mathbf{V} \times \mathbf{B})$$

В большинстве рассмотренных объектов не может поддерживаться статическое электрическое поле, поскольку среда является эффективно сверхпроводящей и любое электрическое поле сразу уничтожается перемещением зарядов к точкам, где произошло нарушение нейтральности. Поэтому механизмы ускорения могут быть связаны только с нестационарным электрическим полем, например, с мощными электромагнитными волнами либо с магнитными полями. Один очень интересный пример механизма первого типа мы рассмотрим ниже.

Основное внимание уделялось моделям, использующим магнитное поле. Конечно, статическое магнитное поле не может совершать работу над частицей, но, если оно меняется со временем, работа может совершаться индукционным полем, пропорциональным  $\partial \mathbf{B} / \partial t$ . Делались попытки найти способы использовать непосредственно бетатронный эффект. Например, при сжатии магнитного поля в некоторой области частицы будут набирать энергию вследствие сохранения адиабатического инварианта. Однако эти механизмы кажутся слишком искусственными и неприменимыми в астрофизических условиях.

Интересным вариантом электромагнитного процесса является ускорение частиц в нейтральных слоях. Считается, что этот процесс играет важную роль в геомагнитном хвосте Земли и в солнечных вспышках. Нейтральные слои возникают в областях, где магнитные силовые линии направлены в противоположные стороны. Условие баланса давлений требует, чтобы сумма теплового давления плазмы и магнитного давления оставалась постоянной. Если плазма выходит из области нейтрального слоя, то устанавливается стационарный поток, который переносит магнитные силовые линии к нейтральному слою. Там происходит «перезамыкание» противоположно направленных силовых линий, сопровождающееся

диссипацией энергии магнитного поля в результате омических потерь. В действительности происходит следующее. Изменение напряженности магнитного поля приводит к возникновению в нейтральном слое индукционного электрического поля, которое может разгонять заряженные частицы до высоких энергий. Этот механизм был детально разработан в связи с солнечными вспышками [9].

Рассмотрим некоторые механизмы более подробно.

Экскурсия в город Железногорск (Горно-химический комбинат и «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва»).

План экскурсии:

1. Посетить горно-химический комбинат.
2. Посетить АО «ИСС» М.Ф.Решетнёва.
3. Посетить отраслевой центр АО «ИСС» М.Ф.Решетнёва.
4. Познакомиться с космическими аппаратами АО «ИСС» М.Ф.Решетнёва.

Отчет об экскурсии на тему «Способы поддержания работоспособности спутникового оборудования в условиях жесткого космического излучения».

### **Тема 1. Школьная лекция «Механизмы ускорения Ферми»**

*Цель:*

Расширить и углубить теоретические знания учащихся о двух вариантах ускорения Ферми.

*Задачи:*

Способствовать развитию речевого аппарата учащихся, умение логически излагать свою мысль.

Приобрести опыт поиска информации по заданной теме.

Способствовать формированию теоретических и практических умений получать и обрабатывать информацию.

*Форма работы:* Лекция с элементами беседы

*Оборудование:* мультимедийный проектор для показа рисунков.

### Ход урока:

№ этапа	Деятельность учителя	Деятельность учеников
I. Организационно-мотивационный этап	Учитель заходит в класс, приветливо здоровается. Разрешает сесть.	Ученики приветствуют учителя стоя. Устанавливается тишина. После того как учитель разрешил сесть, ученики готовы воспринимать речь педагога.
II. Изучение нового материала	Педагог рассказывает материал, ведется беседа.	Ученики записывают необходимую информацию, рассматривают схемы. Затем обсуждают увиденное.
III. Домашнее задание	Пишет на доске Д/З	Записывают Д/З: самостоятельно найти и изучить информацию по теме «Турбулентное ускорение»

#### *Механизм Ферми: первый вариант*

Рассмотрим механизмы ускорения Ферми с двух точек зрения. В этом разделе мы будем близко придерживаться оригинальной версии Ферми, только в несколько упрощенном виде.

В оригинальной работе Ферми рассматривал отражение заряженной частицы от «магнитных зеркал», связанных с магнитными полями в космическом пространстве. Эти зеркала движутся в первом приближении случайно. Ферми рассмотрел, какова будет энергия частиц, которые находятся в этой области в течении некоторого времени  $T$ .

Разберем упрощенный вариант задачи, рассмотрев только одномерный случай. Пусть имеется много магнитных зеркал или облаков, движущихся навстречу частице и вдогонку. Частица будет испытывать столкновения с этими облаками «в лоб» и «вдогонку». Вычислим изменение энергии частицы после одного столкновения.

Рассматриваемая ситуация показана на Рис. 1.1, а. Будем считать массу облака бесконечной, так как его скорость не меняется при столкновении.

Тогда система центра инерции совпадает с облаком, движущимся со скоростью  $V$ . Энергия частицы в этой системе равна

$$E' = \gamma_V(E + Vp),$$

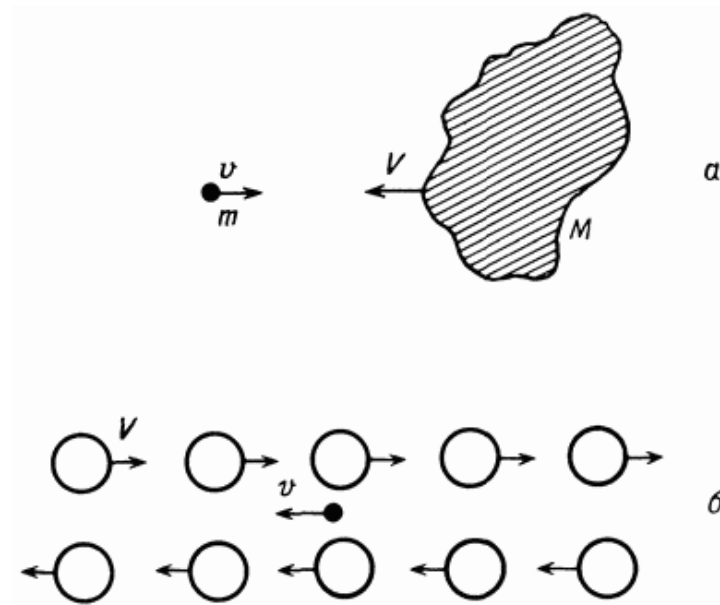


Рис. 1.1. а — столкновение частицы массы  $m$  с облаком массы  $M$ . б -

столкновение частицы с облаками, движущимся в противоположных направлениях (Рисунок взят из книги Космические лучи // Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1990. — Т. 2. Добротность — Магнитооптика. — С. 474).

где

$$\gamma_V = (1 - V^2/c^2)^{-1/2},$$

а релятивистский импульс —  $p' = \gamma_V(p + VE/c^2)$ .

При столкновении энергия частицы сохраняется  $E'_{before} = E'_{after}$ , а ее импульс меняет знак,  $p' \rightarrow -p'$ . Поэтому, переходя в систему отсчета наблюдателя, получим  $E'' = \gamma_V(E' + Vp')$ .

После несложных преобразований это выражение приводится к виду

$$E'' = E + 2\gamma_V^2 E \left( \frac{v}{c} + v/c \right), \text{ т. е.}$$

$$\Delta E = 2\gamma_V^2 E \left( \frac{v}{c} \right) \left( \frac{v}{c} + v/c \right). \quad (1.1)$$

Если произошло столкновение с догоняющей частицей, ее энергия должна уменьшиться на величину

$$\Delta E = -2\gamma_V^2 E \left( \frac{v}{c} \right) \left( \frac{v}{c} + V/c \right). \quad (1.2.)$$

Однако заметим, что вероятность лобового столкновения больше. Из Рис. 1.1,б следует, что частота столкновений пропорциональна относительной скорости частицы и облака, т. е.  $V + v$  лобового столкновения и  $v - V$  столкновения вдогонку. Поэтому вероятность первого равна  $(V + v)/2v$ , а второго —  $(v - V)/2v$ . Отсюда средний прирост энергии за соударение равен

$$\Delta E = \frac{v+V}{2v} 2\gamma_V^2 E \frac{v}{c} \left( \frac{v}{c} + \frac{v}{c} \right) - \frac{v-V}{2v} 2\gamma_V^2 E \frac{v}{c} \left( \frac{v}{c} - \frac{V}{c} \right).$$

Это выражение приводится к простому виду

$$\Delta E/E = 4\gamma_V^2 \left( \frac{v}{c} \right)^2. \quad (1.3)$$

При  $V \ll c$  получаем  $\frac{\Delta E}{E} = 4(V/c)^2$  Отсюда темп набора энергии равен

$$\frac{dE}{dt} = 4M \left( \frac{v}{c} \right)^2 E = \alpha E, \quad (1.4)$$

где  $M$  число столкновений в секунду. Заметим, что это приводит к экспоненциальному росту энергии частицы.



Теперь предположим, что частица остается в области ускорения в течение характерного времени  $\tau$ . Выпишем диффузионное уравнение для ускорения частиц и найдем равновесное решение  $N(E)$ :

$$\frac{dN}{dt} = D\nabla^2 N + \frac{\partial[b(E)N(E)]}{\partial E} - \frac{N}{\tau} + Q(E). \quad (1.5)$$

Мы ищем стационарное решение, поэтому  $\frac{dN}{dt} = 0$ . Диффузия нас не интересует, и можно положить  $D\nabla^2 N = 0$ . Также будем считать, что источники частиц отсутствуют,  $Q(E) = 0$ . В члене, описывающем потери энергии,  $b(E) = -dE/dt$ ; в нашем случае  $b(E) = -\alpha E$ . Таким образом,



Рис. 1.2. Сравнение темпов ускорения и потерь энергии в механизме ускорения Ферми (Рисунок взят из книги Космические лучи // Физическая энциклопедия/ Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1990. — Т. 2. Добротность — Магнитооптика. — С. 471).

уравнение (1.5) приводится к виду 
$$-\frac{\partial[\alpha EN(E)]}{\partial E} - \frac{N(E)}{\tau} = 0. \quad (1.6)$$

Дифференцируя по  $E$  и приводя подобные члены, получим

$$\frac{dN(E)}{dE} = -\left(1 + \frac{1}{\alpha\tau}\right)N(E)/E.$$

Отсюда

$$N(E) = \text{const} E^{-(1+1/\alpha\tau)}. \quad (1.7)$$

В результате получается степенной энергетический спектр [10]. Проблемы, однако, остаются. Согласно первоначальному предложению Ферми, считалось, что частицы в основном сталкиваются с межзвездными облаками. Основные трудности этой концепции заключаются в следующем:

1. Скорости облаков в Галактике очень малы по сравнению со скоростью света. Средняя длина свободного пробега ускоряющихся частиц между столкновениями не известна, но для космических лучей она должна быть равна по крайней мере 1 пс. Это значит, что мало надежды добиться таким образом эффективного ускорения частиц.

2. Мы не рассмотрели потери энергии частиц. Особенно следует обратить внимание на ионизационные потери, поскольку они препятствуют ускорению частиц низких энергий. Вспомним зависимость ионизационных потерь от энергии и сравним их с данным механизмом ускорения (Рис. 1.2). Этот процесс будет иметь место, только если выполнено одно из двух условий. Либо ускорение начинается над горбом на графике потерь, либо оно происходит так быстро, что ионизационные потери не успевают отобрать значительную долю энергии.

3. Теория не дает никаких указаний на то, почему показатель спектра частиц во всех направлениях равен приблизительно 2,5.

Можно существенно улучшить ситуацию, если ограничиться областями с мелкомасштабной турбулентностью. Хорошим примером могут служить оболочки молодых остатков сверхновых, где наверняка присутствует развитая мелкомасштабная турбулентность. Однако и в этом случае отсутствует естественное объяснение того факта, что показатель спектра близок к 2,5.

*Механизм Ферми. Вариант второй - ускорение частиц в сильных ударных волнах*

Сущность механизма Ферми можно изложить, пожалуй, еще проще, если ввести вероятность  $P$  того, что частица останется в области ускорения после одного рассеяния, и величину  $\beta$ , характеризующую среднее увеличение энергии частицы за одно рассеяние  $E = E_0$ . Тогда после  $k$  столкновений останется  $N = N_0 P^k$  частиц с энергией  $E = E_0 \beta^k$ . Исключая  $k$ , получим

$$\frac{\ln\left(\frac{N}{N_0}\right)}{\ln\left(\frac{E}{E_0}\right)} = \ln P / \ln \beta$$

и, следовательно,

$$\frac{N}{N_0} = (E/E_0)^{\ln P / \ln \beta} .$$

Здесь используется величина  $N(\geq E)$ , поскольку некоторая часть частиц, набравших энергию  $E$ , приобретает еще большие энергии. Поэтому

$$dN(E) = \text{const } E^{-1 + \ln P / \ln \beta} dE . \quad (1.8)$$

Ясно, что здесь мы тоже приходим к степенному закону. Чтобы доказать эквивалентность обоих подходов, учтем, что  $P$  связано с  $\tau$ , а из определения  $\beta$  и уравнения (1.4) следует соотношение  $\beta = 1 + \alpha/M$ , где  $\alpha/M$ - относительное увеличение энергии за одно столкновение.

В описанном первом варианте механизма Ферми  $\alpha$  пропорционально  $(\frac{V}{c})^2$  вследствие тормозящего действия соударений вдогонку. Поэтому оригинальный вариант теории Ферми называется ускорением Ферми второго порядка. Очевидно, это очень медленный процесс. Было бы гораздо лучше,

если бы существовали только лобовые столкновения. Из выражения (1.1) ясно, что в этом случае относительное изменение энергии имеет первый порядок по

$V/c$ ,  $\Delta E/E \approx 2V/c$ . Соответственно это будет ускорение Ферми первого порядка.

Недавно Белл и независимо Блендфорд и Острайкер предложили очень привлекательную идею ускорения Ферми первого порядка в сильных ударных волнах. Мы будем следовать версии Белла, поскольку она позволяет лучше понять физическую суть явления по сравнению с более формальным подходом Бленфорда и Острайкера.

В основе механизма лежит представление о сильной ударной волне, распространяющейся в межзвездной среде, где уже имеется некоторое количество частиц высоких энергий. Поскольку волна сильная, возмущение распространяется в межзвездном газе со скоростью, значительно превышающей скорость звука,  $u \gg c_s$ . Это, безусловно, справедливо для взрыва новой, когда вещество выбрасывается со скоростью до  $10^4$  км/с, тогда как альвеновская и звуковая скорости в межзвездном газе не превышают 10 км/с. Для сильной ударной волны увеличение плотности прошедшего через фронт газа выражается очень простой формулой

$$\frac{p_2}{p_1} = (\gamma + 1)/(\gamma - 1), \quad (1.9)$$

где индексы 1 и 2 относятся к газу, соответственно впереди и за фронтом,  $\gamma$  — отношение удельных теплоемкостей. В полностью ионизованном газе  $\gamma = 5/3$ , следовательно,  $\frac{p_2}{p_1} = 4$ .

Теперь посмотрим, что происходит с газом космических лучей вблизи фронта ударной волны. Перед ним частицы распределены изотропно

благодаря рассеянию на альвеновских и магнитозвуковых волнах. Некоторые частицы проходят через фронт, там рассеиваются на неоднородностях и их распределение становится изотропным. Отметим, что при этом газ космических лучей отбирает кинетическую энергию у газа за фронтом. Некоторые частицы увлекаются потоком дальше, а некоторые возвращаются назад в невозмущенный газ. Движению частиц навстречу потоку препятствуют процессы рассеяния, которые также делают распределение космических лучей изотропным. Однако частицы, совершившие этот цикл, приобрели некоторое количество энергии в результате ускорения Ферми первого порядка. Затем они снова подхватываются потоком и цикл повторяется.

Определим  $\beta$  и  $P$  для такого цикла с помощью следующих простых соображений. Оценка величины  $\beta$  проводится так же, как при выводе уравнения (1.1). В этом случае при нормальном падении относительное увеличение энергии частицы за один цикл равно

$$\langle \Delta E/E \rangle = 2\Delta u/c,$$

где  $\Delta u$  — скачок потока на фронте ударной волны. Здесь предполагается, что частицы движутся со скоростью света. При более строгом расчете нужно провести усреднение по углам падения для частиц, движущихся вдоль потока и навстречу ему. Тогда получается соотношение

$$\langle \Delta E/E \rangle = 4/3\Delta u/c,$$

откуда

$$\bar{\beta} = \frac{E}{E_0} = 1 + \frac{4}{3\Delta u}/c. \quad (1.10)$$

Чтобы оценить  $P$  воспользуемся остроумными рассуждениями Белла. Согласно классической кинетической теории, число частиц, пересекающих за

секунду площадку единичной площади, равно  $N_1 \bar{c}/4$ , где  $\bar{c}$  — их скорость,  $N_1$  — концентрация. Эта величина с точностью до  $u/c$ , где  $u$  скорость фронта, равна числу частиц, пересекающих фронт ударной волны. С другой стороны, за фронтом частицы уносятся потоком вещества, причем их распределение в системе отсчета газа изотропно. Таким образом, в стационарном состоянии число частиц, проходящих через фронт навстречу потоку, равно

$$\frac{N_1 c}{4} - u_2 N_2 .$$

Отсюда вероятность выхода  $P$  равна

$$P = 4(\frac{N_1 c}{4} - u_2 N_2)/N_1 c .$$

Поскольку частицы практически не замечают фронт волны, с хорошей точностью можно считать, что  $N_2 = N_1$ . Тогда

$$\bar{P} = 1 - 4u_2/c. \quad (1.11)$$

Найдем логарифм  $\bar{P}$ ,  $\bar{\beta}$ :

$$\ln \bar{P} = \ln \left( 1 - \frac{4u_2}{c} \right) = -4u_2/c ,$$

поскольку  $u_2/c \ll 1$ ,

$$\ln \bar{\beta} = \ln \left( 1 + \frac{4\Delta u}{3c} \right) = 4\Delta u/3c .$$

Отсюда

$$\ln \frac{\bar{P}}{\ln \bar{\beta}} = -3u_2/(u_1 - u_2) .$$

Теперь воспользуемся первым из соотношений для ударных волн (они называются уравнениями Ранкина — Гюгоньо), выражающим сохранение

массы в пересекающем фронт потоке (все величины определены в системе покоя фронта)

$$p_1 u_1 = p_2 u_2 .$$

Поскольку  $\frac{p_2}{p_1} = 4$ , получаем  $\frac{u_1}{u_2} = 4$ . Отсюда

$$\frac{\ln \bar{P}}{\ln \bar{\beta}} = -1. (1.12)$$

Подставляя это выражение в (1.8), получим

$$dN(E) = const E^{-2} dE. (1.13)$$

Значение показателя спектра очень близко к 2,5. Приведенные соображения очень красивы: единственное условие — что ударная волна сильная. Очевидно, имеется много способов усложнения теории. В настоящее время эти вопросы интенсивно разрабатываются.

Как уже указывалось, большое достоинство этого механизма состоит в том, что он обеспечивает ускорение частиц все время, пока ударная волна остается сильной. Поэтому в остатках сверхновых ускорение продолжается до тех пор, пока они не расширятся до значительных размеров, порядка 10-15 пс. Это позволяет избежать трудностей, связанных с адиабатическими потерями.

Основным условием действия описанного механизма является присутствие сильной ударной волны и некоторого количества релятивистских частиц. Таким образом, этот механизм, по-видимому, может реализоваться в самых различных объектах, включая ядра галактик и горячие пятна во внегалактических радиоисточниках [10].

## Тема 2. «Турбулентное ускорение»

Если при фермиевском ускорении процессы резонансного взаимодействия волна-частица обеспечивали только рассеяние частиц при взаимодействии с турбулентностью, широкий класс ускорительных

механизмов, за которым закрепилось название турбулентного ускорения, рассматривает ускорение случайными электрическими полями при выполнении условий резонанса. Для каждой из ветвей колебаний  $\omega(\mathbf{k})$  могут выполняться соответствующие резонансные условия, поэтому в соответствии с возбуждаемым типом турбулентности группа частиц может ускоряться ленгмюровской турбулентностью, нижегибридной, свистовой и т.д. Эффективность ускорения определяется спектром соответствующей турбулентности при учете потерь и выхода частиц из ускоряющей области. В космофизических системах, как правило, основная доля энергии сосредоточена в МГД (Магнитогидродинамической) турбулентности, с которой в соответствии с резонансными условиями наиболее эффективно взаимодействуют быстрые частицы, поэтому ниже мы более подробно рассмотрим резонансное турбулентное ускорение при развитии магнитогидродинамической турбулентности. Заметим, что для частиц со скоростями  $v \gg c_A$  черенковский резонанс не играет существенной роли и ускорение может быть обусловлено либо рассмотренным выше механизмом Ферми, либо циклотронным резонансом [10].

Рассмотрим холодную плазму давления  $P$  в магнитном поле  $B$  ( $P \ll B^2/8\pi$ ), в которой возбуждена МГД турбулентность с основным масштабом  $L_0 \gg r_L$ , (где  $r_L$  - ларморовский радиус ускоряемых частиц), угловое распределение волновых векторов, которой не имеет максимумов при больших углах с внешним полем  $B$  (в этом случае циклотронный резонанс хорошо описывается одномерной моделью). Будем считать внешнее магнитное поле однородным  $\mathbf{B}_0 = B_0 \mathbf{h}$ ,  $\mathbf{h} = \mathbf{z}/z$  и постоянным во времени. Рассмотрим волны, распространяющиеся вдоль магнитного поля  $k_x = k_y = 0$ ,  $k_z = k$ . Разлагая функцию распределения и поле волны в ряд Фурье приходим к квазилинейному уравнению для функции распределения быстрых частиц ( $v \gg c_A$ )

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = \pi \frac{z^2 e^2}{m^2 c^4} (\widehat{S}_0 + \widehat{S}_1 + \widehat{S}_2) f_0, \quad (2.1)$$



где  $\hat{S}_0, \hat{S}_1, \hat{S}_2$ - соответственно операторы нулевого, первого и второго по  $(c_A/v_{||})$  порядка малости. В нулевом приближении чистого рассеяния

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = \pi \frac{Z^2 e^2}{m^2 c^4} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\Phi(|v \cos \theta|)}{|v \cos \theta|} \frac{\partial f_0}{\partial \theta}, \quad (2.2)$$

где  $\Phi = dh^2/dk$  спектральная функция турбулентности при резонансном  $|k| \approx \omega_B / |v \cos \theta|$ ,  $Z_e$  - заряд частицы. Для степенного спектра с показателем степени  $\nu$ , т.е. при

$$\begin{aligned} \Phi(|v \cos \theta|) &= \frac{dh^2}{dk} |k| = \omega_B / |v \cos \theta| = \frac{h_0^2 L}{(kL)^\nu} |k| = \omega_B / |v \cos \theta| = \\ &h_0^2 L \left[ \frac{v}{L \omega_B} \right]^\nu |\cos \theta|^\nu \end{aligned} \quad (2.3)$$

уравнение (2.2) принимает вид

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = \frac{\pi Z^2 e^2}{m^2 c^2} \frac{h_0^2 L \nu^{V-1}}{(L \omega_B)^\nu} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta |\cos \theta|^{V-1} \frac{\partial f_0}{\partial \theta}, \quad (2.4)$$

Решением (2.4) является стационарное изотропное распределение, а также дискретный набор экспоненциально затухающих угловых гармоник.

Положив  $f_0 = \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 t}{\lambda_1^2 \tau}\right) \psi_n(\theta)$ , для  $\psi_n(\theta)$  получаем уравнение

$$-\lambda_n^2 \phi_n(\theta) = \frac{\lambda_1^2 \tau \pi Z^2 e^2 h_0^2 L \nu^{V-1}}{m^2 c^2 (L \omega_B)^\nu} \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta |\cos \theta|^{V-1} \frac{\partial \phi_n}{\partial \theta}, \quad (2.5)$$

Полагая  $\frac{\lambda_1^2 \tau \pi Z^2 e^2 h_0^2 L \nu^{V-1}}{m^2 c^2 (L \omega_B)^\nu} = 1$ , получаем зависимость времени рассеяния  $\tau$

от скорости частицы для степенного спектра турбулентности

$$\tau = \frac{1}{\lambda_1^2 \omega_B} \left[ \frac{B}{h} \right]^2 \left[ \frac{v}{L \omega_B} \right]^{1-\nu}, \quad (2.6)$$

За время  $t = \tau$  первая гармоника  $f_{01}$  уменьшится в  $e$  раз, т.е.  $\tau$  характеризует изотропизацию углового распределения. Остальные гармоники спадают быстрее ( $\lambda_n^2 = n(n+1)$ ,  $\tau_n = \lambda_1^2 \tau / \lambda_n^2$ ). Собственными функциями углового оператора правой части (2.5) при  $\nu = 1$  являются полиномы Лежандра от  $\cos \theta$ . В нулевом приближении по параметру  $(c_A/v_{||})$ , т.е. за время изотропизации  $\tau$  энергия частицы с  $v \gg c_A$ , не изменяется. Поэтому

при исследовании процесса ускорения за времена  $t=\tau$  функцию распределения можно считать изотропной. Переобозначая

$$f_0 \Rightarrow \langle f_0 \rangle = \frac{1}{4\pi} \int_0^\pi \int_0^{2\pi} f_0 \sin \theta \, d\theta d\phi, \text{ усредняя (2.1) по телесному углу и}$$

учитывая, что  $\langle S_{qf_0} \rangle = 0, \langle S_{if_0} \rangle = 0,$

$$\langle S_2 f_0 \rangle = \left\langle \frac{\sigma c_A}{v_\perp} \frac{\partial}{\partial v_\perp} v_\perp \frac{\phi \sigma c_A}{|v_\parallel|} \frac{\partial f_0}{\partial v_\perp} \right\rangle, \sigma = \pm 1, \text{ (2.7)}$$

получаем после усреднения диффузионное уравнение ускорения

$$\frac{\partial f_0}{\partial t} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial}{\partial v} v^2 D(v) \frac{\partial f_0}{\partial v}, \text{ (2.8)}$$

с коэффициентом диффузии в пространстве скоростей

$$D = \frac{\pi Z^2 e^2 c_A^2}{m^2 c^2 v} \int_0^{\pi/2} \frac{\sin^3 \theta}{\cos \theta} \phi(v \cos \theta) d\theta, \text{ (2.9)}$$

Для спектра турбулентности вида (2.3) с учетом того, что

$$\int_0^{\pi/2} \sin^3 \theta |v \cos \theta|^{v-1} d\theta = - \int_0^{\pi/2} (\cos \theta)^{v-1} (1 - \cos^2 \theta) d(\cos \theta) = 2/v(v+2)$$

коэффициент диффузии (2.9) принимает вид

$$D(v) = \frac{2}{v(v+2)} \frac{v c_A^2}{L} \left[ \frac{h_0}{B_0} \right]^2 \left[ \frac{v}{L \omega_B} \right]^{v-2}, \text{ (3.0)}$$

т.е.  $D \sim v^{-1}$ . При этом, решение диффузионного уравнения (2.8) с начальным условием  $f(t=0) \sim \delta(v)$  имеет вид

$$f(v, t) = K v^{3(v-1)/(3-v)} [Dt]^{-3/(3-v)} \exp \left\{ - \frac{v^2}{(3-v)^2 Dt} \right\}, \text{ (3.1)}$$

где  $K = const$ . Из (3.1) следует, что при  $v=1$  асимптотически формируется максвелловский спектр, при  $v=2$  формируется спектр вида  $\exp(-v/v_0)$ .

Заметим, что последний спектр характерен, например, для спектра протонов за фронтом ударных волн солнечных вспышек.

Для случаев магнитогидродинамических волн, распространяющихся только в одном направлении, турбулентное ускорение отсутствует. Действительно, причиной ускорения являются случайные электрические поля  $E$  волн. Время ускорения  $\tau_a \sim (eE)^{-2}$ , где значение электрического поля связано с магнитным полем волны соотношением  $E \sim c_A h/c$ . Если волны распространяются в одном направлении, то в системе координат,

движущейся вместе с волнами, электрическое поле  $E=0$  и ускорение отсутствует во всех системах, движущихся относительно исходной с постоянной скоростью.

Отметим, что при широком спектре волн наряду с турбулентным ускорением будет происходить фермиевское ускорение при адиабатическом отражении частиц от крупномасштабных волн. Для степенного спектра при  $\nu \leq 2$  ускорение частиц определяется как турбулентным, так и фермиевским механизмами, при  $\nu > 2$  ускорение определяется механизмом Ферми.

Турбулентное ускорение, обусловленное резонансным взаимодействием частиц с волнами, является универсальным свойством турбулентности при непрерывном потоке энергии по спектру турбулентности в пространстве волновых чисел. Взаимодействие частиц с волнами для убывающего с  $k$  спектра турбулентных пульсаций сосредоточено в коротковолновой области спектра, поэтому эффективная диссипация связана с хвостом функции распределения и ускорением малой доли быстрых частиц. Граничная скорость быстрых частиц определяется внутренним масштабом турбулентности  $L_0 \propto k_0^{-1} = v_0/\omega_B$ . Спектр пульсаций при  $k > k_0$  обрывается, и частицы с  $v > v_0$  перестают ускоряться из-за отсутствия резонансных волн [15].

### **Тема 3. «Ускорение ударными волнами»**

Многочисленные измерения, выполненные в межпланетном пространстве, показывают, что вблизи фронтов ударных волн практически всегда наблюдается повышение интенсивности частиц сверхтепловых энергий. Как показывают эксперименты, форма спектра ускоренных частиц вблизи ударного фронта, как правило, описывается степенным законом, а интенсивность частиц экспоненциально нарастает по мере приближения к фронту. Оба эти момента, как было показано выше, являются характерными для регулярного процесса ускорения. Исключения составляют возрастания интенсивности быстрых частиц, наблюдающихся в узкой окрестности фронтов квазиперпендикулярных ударных волн. Эти события

характеризуются мягким спектром, большой анизотропией и обусловлены ускорением частиц электрическим полем  $E = -[uB]/c$ .

Особенно много измерений было выполнено вблизи отошедшей ударной волны, возникающей при обтекании земной магнитосферы сверхзвуковыми потоками солнечного ветра. Детальное сопоставление теории регулярного ускорения, разработанной применительно к данному случаю с учетом геометрии ударной волны и результатов экспериментов показывает, что совокупность наблюдательных фактов — спектр ускоренных частиц, их угловое и пространственное распределение, степень модификации ударной волны — хорошо описываются теорией [10].

Анализ ряда экспериментов показал, что формы спектров ускоренных частиц, наблюдаемых вблизи фронтов межпланетных ударных волн, образующихся вследствие хромосферных вспышек на Солнце, соответствуют предсказаниям теории регулярного ускорения. Адекватность теории подтверждается также сравнением расчетов спектральных и пространственных характеристик ускоренных частиц и порождаемой ими МГД турбулентности с экспериментом. Типичный пример спектра протонов, измеренный на фронте межпланетной ударной волны приведен на Рис. 3.1, где изображена дифференциальная интенсивность  $dJ/d\varepsilon$  в зависимости от энергии  $\varepsilon$ . Эксперимент показывает, что ускорению подвергаются примерно  $\sim 1\%$  частиц. Несмотря на то, что максимальная энергия ускоренных частиц невелика, они содержат около  $25\%$  всей внутренней энергии плазмы. Плавный переход от теплового участка спектра ( $\varepsilon < 200$  эВ) к спектру ускоренных ( $\varepsilon > 200$  эВ) указывает на то, что процесс ускорения начинается непосредственно из теплового распределения. Именно этот принцип заложен в кинетической модели регулярного ускорения. Сравнение расчета, выполненного в рамках этой модели, с экспериментом показывает их хорошее согласие. Этот факт указывает на то, что при всей схематичности в

описании структуры теплового фронта, которую дает кинетическая модель, она правильно описывает не только процесс регулярного ускорения, но в общих чертах хорошо отражает наиболее характерные моменты процесса инжекции частиц в режим ускорения.

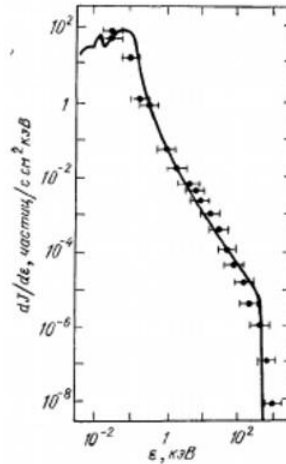


Рис. 3.1. Дифференциальная интенсивность ионов на фронте межпланетной ударной волны 27 августа 1978 г. в зависимости от кинетической энергии.

Значки — экспериментальные значения, кривая — расчет в рамках кинетической модели (Рисунок взят из книги Ellison D.C., Möbius E.// *Astrophys. J.* — 1990. — V.352. — P. 394).

Процесс регулярного ускорения привлекался также, как возможный механизм генерации солнечных космических лучей, испускаемых во время солнечных хромосферных вспышек. Хотя возможности детального сравнения теории с экспериментом здесь ограничены, тем не менее многие особенности спектра солнечных космических лучей могут быть описаны в рамках теории регулярного ускорения [12].

Таким образом, детальное сопоставление теории с измерениями, выполненными в межпланетном пространстве, показывает, что механизм регулярного ускорения хорошо объясняет явления генерации быстрых частиц на фронтах ударных волн. Основные особенности, вытекающие из этого сопоставления, в частности, высокая эффективность процесса регулярного

ускорения, могут быть использованы в задачах приложения этого процесса к удаленным объектам, где прямые измерения в настоящее время невозможны.

**Домашнее задание:** Объяснить что происходит на каждой области фронта (Рис.3.2.) и продемонстрировать это на примерах (схемы, рисунки, презентация, видео и др.).

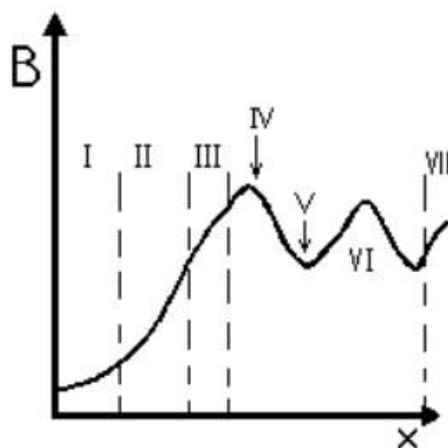


Рис. 3.2. Профиль сверхкритической бесстолкновительной ударной волны I-VII - области фронта (Рисунок взят из книги Е.Е. Антонова Ускорительные механизмы в космосе//Учебное пособие НИИЯФ и Физ.фак. МГУ, 1988).

**Ответ:** I – асимптотически невозмущенная область набегающего течения перед фронтом , II – «подножие» (foot) – область медленного нарастания магнитного поля и плотности плазмы благодаря отраженным от фронта ионам, III – «скачок» (ramp) магнитного поля – область максимального градиента поля, IV – максимальный выброс магнитного поля над его асимптотическим значением за фронтом (overshoot) , в котором величина магнитного поля оказывается больше рассчитанной по соотношению Гюгонио, V – первый минимум поля (undershoot), VI – область осцилляций, затухающих с ростом расстояния фронта, VII – асимптотически возмущенная область за фронтом. Плазменные параметры в областях I и VII связаны адиабатой Гюгонио.

#### Тема 4. « Ускорение в солнечной плазме»

Гелиомагнитосфера – область, простирающаяся до десятков а.е. – заполнена плазмой солнечного ветра (СВ), которая распространяется почти радиально от Солнца. На расстоянии  $10 \div 15 R_s$  ( $R_s$  – радиус Солнца) средняя скорость потока заряженных частиц СВ достигает  $400 \div 500$  км/с и в дальнейшем практически не изменяется с расстоянием вплоть до области взаимодействия с межзвёздной средой. Из сохранения потока вещества, таким образом, следует, что концентрация частиц СВ убывает обратно пропорционально квадрату гелиоцентрического расстояния, при этом её значение около Земли составляет  $N \sim 5 \text{ см}^{-3}$ , а температура  $T \sim 10^5$  К. Важным компонентом межпланетной среды является вмороженное в плазму магнитное поле  $B$ . Комбинация расширения СВ с вращением Солнца приводит к тому, что вмороженные в плазму силовые линии регулярного магнитного поля имеют форму архимедовой спирали с радиальной и азимутальной компонентами  $B_r \approx B_{r0} (r_0/r)^2$ ,  $B_\phi \approx B_{\phi0} r_0^2 \Omega_0 / u_r r$ , где  $\Omega_0 = 2.7 \times 10^{-6}$  рад/с – угловая скорость вращения Солнца,  $r$  – гелиоцентрическое расстояние,  $u_r$  – радиальный компонент скорости СВ, индекс “0” соответствует исходному уровню (Рис. 4.1). В частности, вблизи орбиты Земли значение  $B$  достигает  $5 \cdot 10^{-5}$  Гс. Хотя напряжённость межпланетного магнитного поля невелика, а плотность его энергии составляет лишь 1 % от плотности кинетической энергии СВ, оно играет большую роль в термодинамике и динамике взаимодействия потоков СВ между собой, а также в процессах ускорения КЛ [10].

Важно понимать, что СВ со спиральным вмороженным в плазму магнитным полем и регулярно меняющимися  $N$  и  $T$  является идеализацией, удобной для аналитического рассмотрения. В действительности же на этот крупномасштабный фон, как правило, накладываются случайные флуктуации скорости плазмы, её концентрации, температуры и магнитного поля. Масштабы этих неоднородностей находятся в очень широком диапазоне: от

нескольких а.е. до величин порядка дебаевского радиуса (для приведённых выше параметров плазмы  $r_D \sim 10^3$  см вблизи орбиты Земли).

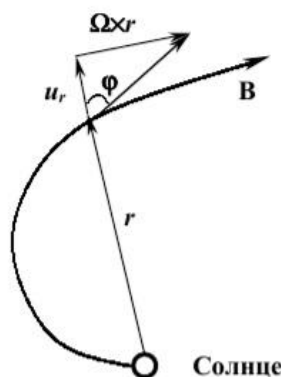


Рис. 4.1. Структура силовых линий межпланетного магнитного поля (Рисунок взят из книги Лытова М.Ф., Остряков В.М. Физика космической плазмы. Ускорение тяжёлых ионов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 108 с).

В межпланетной плазме СВ постоянно существуют различные типы возмущений, такие как альвеновские, магнитозвуковые и ударные волны, тангенциальные и вращательные разрывы, нелинейные волны и др.

Сильные возмущения плазмы формируются на границе гелиосферы – области, внутри которой СВ движется относительно Солнца со сверхзвуковой скоростью. Там образуются две ударные волны (УВ). Одна из них (ближайшая к Солнцу) – результат взаимодействия СВ с межзвёздной плазмой. За этой УВ следует ограниченная контактной поверхностью область, где скорость движения межзвёздного газа дозвуковая. Извне гелиосфера ограничена бесстолкновительной УВ, на которой происходит торможение межзвёздной плазмы. Заметим, что взаимодействие СВ с межзвёздным газом должно сопровождаться высокой степенью турбулизации среды. Все эти крупномасштабные магнитогидродинамические структуры могут обеспечивать генерацию быстрых частиц из популяции тепловых ионизованных атомов межзвёздного газа, а также приводят к модуляции



потоков и спектров ГКЛ (галактические космические лучи) и СКЛ (солнечные космические лучи).

УВ генерируются также в результате взаимодействия быстрого (около 600 км/с) и медленного (~ 300 км/с) коротящих потоков СВ. При этом чаще всего образуются сразу две УВ: прямая и обратная. Быстрые потоки СВ исходят из тех областей, где магнитное поле близко к радиальному (например, из корональных дыр). Медленные потоки СВ связаны, по видимому, с областями короны, где имеется значительный тангенциальный компонент магнитного поля. Там, где УВ имеют парную структуру, между ними обычно располагается контактная поверхность, отделяющая плазму высокоскоростного потока от спокойного СВ. Потоки энергичных ионов (0.1÷5 МэВ) детектируются в межпланетном пространстве на расстояниях от 0.3 до 10 а.е. Причём с увеличением гелиоцентрического расстояния ( $r > 2.5$  а.е.) возрастания интенсивности числа частиц приобретают характер двойных пиков, приходящихся на переднюю и заднюю границы коротящих областей взаимодействия (КОВ). Типичная длительность таких событий – 4÷10 суток, что соответствует конвективному выносу КОВ с угловыми размерами 50÷130. На межпланетное происхождение потоков ускоренных ионов указывает также независимость их интенсивности от расстояния до Солнца (а иногда даже её возрастание с увеличением  $r$ ). Поскольку интенсивность этих потоков повышается в непосредственной близости от КОВ, естественно предположить, что эти возрастания обусловлены регулярным ускорением частиц коротящими УВ.

Мощные межпланетные УВ могут генерироваться и при солнечных вспышках, поскольку крупные корональные извержения массы (КИМ, или СМЕ – coronal mass ejection) зачастую порождают распространяющиеся впереди них УВ. При этом из короны выбрасывается в среднем порядка  $3 \times 10^{16}$  г вещества, а начальная энергия УВ достигает  $10^{32}$  эрг, что сопоставимо с полной энергией солнечной вспышки.

Существуют и менее энергичные проявления солнечной активности, порождающие УВ. Например, распад магнитных волокон характеризуется более медленным, чем при вспышках, и длительным выделением энергии, приводя к разгону плазмы в короне вплоть до 1000 км/с [9].

### **Тема 5. «Нагрев частиц»**

Одним из очень красивых и важных проявлений стохастичности может служить своеобразный механизм стохастического ускорения и стохастического нагрева частиц. В первом случае происходит ускорение частиц. Во втором — увеличение их энергии, хотя средняя скорость при этом не изменяется. Идея механизма стохастического ускорения частиц была предложена Ферми для объяснения происхождения быстрых частиц в космических лучах. Она состояла в том, что при столкновениях заряженных частиц с беспорядочно движущимися магнитными облаками в межзвездном пространстве частицы должны в среднем ускоряться. Рассматривая облако как гигантскую частицу большой массы, легко понять причину ускорения. При единичных актах столкновения частица приобретает или отдает энергию в зависимости от того, движется ли облако навстречу частице или от нее. Если скорости тел, с которыми сталкивается частица, распределены случайно, то можно сказать, что число тел, движущихся в одном направлении, равно числу тел, движущихся в обратном направлении. Поэтому частица будет чаще сталкиваться с телами, движущимися ей навстречу, так как они встречаются чаще. Отсюда следует, что частица будет чаще приобретать энергию, чем отдавать ее. Так возникает эффективное ускорение частиц, называемое ускорением Ферми.

При определенной симметрии задачи может оказаться так, что скорость частицы в среднем не изменяется, хотя ее отдельные значения могут становиться все больше и больше. В этом случае растет среднее значение квадрата скорости, т. е. энергия частицы, и мы приходим к случаю стохастического нагрева. Ускорение всегда сопровождается нагревом. Обратное не всегда верно.

*Стохастичность и идеи нагрева и ускорения.* В действительности очень часто случайные силы или тела отсутствуют, и тем не менее идеи стохастического ускорения или нагрева могут быть реализованы. Теперь мы это можем хорошо себе представить, так как уже знаем, что в нелинейных системах хаотические движения могут возникнуть в результате локальной неустойчивости. Развитие понятия –динамических систем и анализ различных физических ситуаций, в которых возникает стохастичность, вдохнуло новую жизнь в идеи ускорения и нагрева. Оказалось, что такие возможности достаточно широко распространены, и мы продемонстрируем очевидность этого на очень простых примерах. Мы покажем, что стохастический нагрев или ускорение частиц могут возникать в регулярных полях очень простой структуры, и это отразит еще одно удивительное явление нелинейных систем [6].

*Модель Улама.* То обстоятельство, что механизм ускорения частиц может возникать в результате нелинейных взаимодействий, а не в результате действия случайных полей, по-видимому, было одним из направлений исследований Ферми, к которому он относился с определенной степенью настойчивости. Об этом, в частности, свидетельствуют работы по поиску термализации в одномерных цепочках ангармонических осцилляторов. В дальнейшем Улам предложил рассмотреть совсем простую, на первый взгляд задачу о частице (шарике), движущейся между двумя упруго отражающими его стенками. Одна из стенок осциллирует по некоторому периодическому закону.

Рис. 5.1 показывает, как устроена модель Улама. Поле тяжести предполагается отсутствующим. Мы приведем здесь наиболее элементарный анализ, чтобы продемонстрировать лишь характер физической ситуации, приводящей к ускорению частицы.

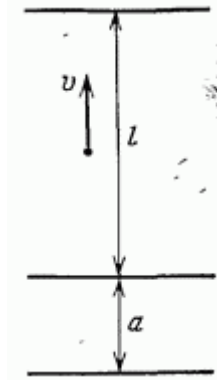


Рис. 5.1. Частица между двумя стенками. Нижняя стенка осциллирует с амплитудой  $\alpha$  (Рисунок взят из Большой Советской Энциклопедии

[Электронный ресурс], URL — <mailto:http://bse.sci-lib.com/>).

Нижняя стенка на Рис. 5.1 колеблется с амплитудой  $\alpha$ , минимальное расстояние между стенками равно  $l$ . Пусть  $t_n$  есть момент  $n$ -го столкновения шарика с нижней стенкой, а  $T$  — период ее колебаний. Введем понятие «фазы»  $\xi_n$  при  $n$ -м столкновении:

$$\xi_n = \frac{t_n}{T} (\text{mod } 1), \quad (5.1)$$

т. е. область изменения  $\xi \in (0,1)$ . Обозначим через  $x(t)$  координату осциллирующей стенки, отсчитываемой снизу вверх. Примем для  $x(t)$  параболический закон:

$$x(t) = 4a\xi(1 - \xi). \quad (5.2)$$

Из (5.2) следуют очевидные соотношения:

$$x(0) = x(T) = 0, \quad x\left(\frac{T}{2}\right) = a.$$

Закон изменения скорости нижней стенки получается дифференцированием  $x(t)$ :

$$V(t) = V_0(1 - 2\xi); \quad V_0 = 4a/T. \quad (5.3)$$

Пусть  $v(t)$  — скорость частицы, а  $v_n$  — ее скорость перед столкновением:

$$v_n = v(t_n - 0).$$

Эту величину удобно записать в безразмерной форме:

$$u_n = v_n/V_0.$$

Предположим, что  $a/l \ll 1$ . (5.4)

В этом приближении легко записать уравнения движения частицы в виде отображения:

$$\begin{aligned} u_{n+1} &= u_n + \frac{2}{v_0} V(t_n) = u_n + 2(1 - 2\xi_n), \\ \xi_{n+1} &= \xi_n + \frac{l}{2au_{n+1}} \pmod{1}. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Вычисление якобиана

$$J = \frac{\partial(u_{n+1}, \xi_{n+1})}{\partial(u_n, \xi_n)} = 1$$

показывает, что переменные  $(u, \xi)$  являются канонически сопряженной парой. В простейшем варианте достаточно больших скоростей  $u \gg 1$ . Поэтому

$$\Delta u_n = u_{n+1} - u_n = 2(1 - 2\xi_n). \quad (5.6)$$

Условие локальной неустойчивости можно получить из (5.5) также в простейшем варианте:

$$K = \left| \frac{\delta \xi_{n+1}}{\delta \xi_n} - 1 \right| = \frac{2l}{au^2} \gtrsim 1. \quad (5.7)$$

Условие стохастичности (5.7) показывает, что неравенство (5.4) должно быть достаточно сильным. Из него также вытекает, что существует ограничение на максимально возможную скорость:

$$u \lesssim u_0 = (2l/a)^{1/2}. \quad (5.8)$$

Условия (5.7) и (5.8) означают, что при достаточно малых скоростях действительно возникает стохастическое ускорение частиц вплоть до скоростей порядка  $u_0$ . Быстрой переменной, по которой происходит перемешивание на малых временах, является фаза  $\xi$ . По переменной  $u$  происходит медленная диффузия.

Конечно, граница стохастичности  $K \sim 1$  и граница ускорения  $u \sim u_0$  являются весьма приближенными, и существует некоторая переходная

область между той частью фазового пространства, где диффузионное движение частицы является достаточно выраженным, и той частью фазового пространства, куда частица проникнуть не может. Мы здесь остановимся лишь на некотором грубом описании кинетики частицы [8].

Будем считать, что движение происходит в области  $u \in (0, u_0)$ , т. е. условие нормировки функции распределения имеет вид

$$\int_0^{u_0} du F(u, t) = 1.$$

Изменение  $\Delta u$  и дается формулой (5.6). Однако время между двумя последовательными столкновениями частицы с верхней стенкой  $\Delta t \sim 2l/u$ , т. е. оно не является константой и зависит от скорости. Поэтому величину  $\Delta t$  следует вычислить с большей точностью.

Время пролета частицы от верхней стенки до столкновения с нижней стенкой равно  $l/v$ . Время пролета от столкновения с нижней стенкой обратно до верхней стенки равно  $l/(v + \Delta v)$ , так как скорость изменилась на величину  $\Delta v$ . Складывая эти выражения, получаем

$$\Delta t = \frac{l}{v} + \frac{l}{v + \Delta v} \approx \frac{2l}{v} \left(1 - \frac{1}{2} \frac{\Delta v}{v}\right). \quad (5.9)$$

Далее увидим, что ситуация, в которой время между двумя последовательными столкновениями в последовательности событий марковского типа является переменным и зависит само от изменения величин при столкновении, является достаточно частой. В формулах для коэффициентов переноса

$$\mathcal{A} = \left\langle \left\langle \frac{\Delta u}{\Delta t} \right\rangle \right\rangle, \quad \mathcal{B} = D = \left\langle \left\langle \frac{(\Delta u)^2}{\Delta t} \right\rangle \right\rangle \quad (5.10)$$

величина  $\Delta t$  попадает под знак усреднения.

В нашем случае скобки  $\langle \langle \dots \rangle \rangle$  означают усреднение по  $\xi$ . Подставляя в (5.10) выражения (5.6), (5.9), находим

$$\mathcal{A} = \frac{1}{2} \frac{v_0}{l}, \quad D = \mathcal{B} = \frac{2}{3} \frac{v_0}{l} u, \quad (5.11)$$

т. е. соотношение

$$\mathcal{A} = \frac{1}{2} \frac{\partial \mathcal{B}}{\partial u}$$

имеет место. Поэтому уравнение диффузии имеет дивергентный вид

$$\frac{\partial F}{\partial t} = \frac{V_0}{3l} \frac{\partial}{\partial u} u \frac{\partial F}{\partial u} \quad (5.12)$$

с граничным условием

$$u \left. \frac{\partial F}{\partial u} \right|_{u=u_0} \approx 0, \quad (5.13)$$

выражающим отсутствие потока частиц через границу.

Стационарное распределение  $F_0$  получается из уравнения (5.12), если положить в нем  $\frac{\partial F}{\partial t} = 0$ . Отсюда с учетом условия (5.13) имеем

$$F_0 = \text{const} = 1/u_0.$$

Время релаксации к равновесному распределению  $F_0$  совпадает со временем диффузии и равно

$$\tau_D \sim \frac{l}{V_0} u_0.$$

Используя (5.8), получаем

$$\tau_D \sim \frac{l}{V_0} \left(\frac{l}{a}\right)^{1/2}. \quad (5.14)$$

Рассмотрим достаточно малые времена  $t \ll \tau_D$  такие, что равновесное распределение  $F_0$  еще не успело установиться. Умножим уравнение (5.12) на  $u$  и проинтегрируем его по  $u$ . В результате получаем уравнение для первого момента

$$\frac{d}{dt} \langle u \rangle = \frac{V_0}{3l}, \quad (5.15)$$

откуда

$$\langle u \rangle = \frac{V_0}{3l} t + \text{const}. \quad (5.16)$$

В этом и есть центральный результат модели. Регулярное движение (осцилляции стенки) привело к хаотическому изменению фазы столкновения  $\xi$ . Следствием этого возникло ускорение частиц (5.15) или (5.16) в среднем [15].

### Темы докладов:

1. Ускорение в поле тяжести;
2. Влияние трения на динамику в волновом пакете;
3. Биография Улама.

### Практическое занятие.

Рассмотрим простейшую модель, описывающую одномерное движение нерелятивистской заряженной частицы в осциллирующем с частотой  $\omega$  электрическом поле  $\mathbf{E}(t) = (E_0 \cos[\omega t + \alpha(t)], 0, 0)$  со случайно меняющейся фазой  $\alpha(t)$ :

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{q}{m} E_0 \cos[\omega t + \alpha(t)], \quad (1)$$

где  $u$  – скорость частицы в направлении  $x$ ,  $q, m$  – ее заряд и масса соответственно.

В качестве  $\alpha(t)$  используем марковский дихотомический процесс (случайный телеграфный сигнал) (т.е.  $\alpha(t)$  – ступенчатая случайная функция, принимающая с одинаковой вероятностью постоянные значения  $\pm\sigma$ , при этом имеет среднее значение  $\langle \alpha(t) \rangle = 0$  и экспоненциально спадающую корреляционную функцию:  $K(|t_1 - t_2|) = \sigma^2 e^{-2\lambda|t_1 - t_2|}$ .

Из уравнения (1) можно получить уравнение (3), если использовать формулу для произвольной функции  $F$  дихотомического шума

$$F(\alpha(t)) = \frac{1}{2} [F(\sigma) + F(-\sigma)] + \frac{\alpha(t)}{2\sigma} [F(\sigma) - F(-\sigma)], \quad (2)$$

$$\frac{dV}{d\tau} = \cos \sigma \cos \tau - \frac{\sin \sigma}{\sigma} \alpha(\tau) \sin \tau, \quad (3)$$

здесь использованы безразмерные переменные:

$$\tau = \omega t, \quad V = \frac{u}{u_0}, \quad u_0 = \frac{qE_0}{m\omega}.$$

Параметр  $u_0$  задает характерную скорость заряда в осциллирующем поле. Уравнение (3) представляет собой исходное стохастическое дифференциальное уравнение.

Уравнение (3) и будет моделироваться в Scilab.



## Тема 6. «Механизмы ускорения заряженных частиц с помощью различных ускорителей»

Ускорители заряженных частиц (УЗЧ) — устройства для получения заряженных частиц (электронов, протонов, атомных ядер, ионов) больших энергий. Ускорение производится с помощью электрического поля, способного изменять энергию частиц, обладающих электрическим зарядом. Магнитное поле может лишь изменить направление движения заряженных частиц, не меняя величины их скорости, поэтому в ускорителях оно применяется для управления движением частиц (формой траектории). Обычно ускоряющее электрическое поле создаётся внешними устройствами (генераторами). Но возможно ускорение с помощью полей, создаваемых др. заряженными частицами; такой метод ускорения называется коллективным. УЗЧ следует отличать от плазменных ускорителей, в которых происходит ускорение в среднем электрически нейтральных потоков заряженных частиц (*плазмы*).

УЗЧ — один из основных инструментов современной физики. Ускорители являются источниками как пучков первичных ускоренных заряженных частиц, так и пучков вторичных частиц (мезонов, нейтронов, фотонов и др.), получаемых при взаимодействии первичных ускоренных частиц с веществом. Пучки частиц больших энергий используются для изучения природы и свойств *элементарных частиц*, в ядерной физике, в физике твёрдого тела. Всё большее применение они находят и при исследованиях в др. областях: в химии, биофизике, геофизике. Расширяется значение УЗЧ различных диапазонов энергий в металлургии — для выявления дефектов деталей и конструкций (дефектоскопия), в деревообделочной промышленности — для быстрой высококачественной обработки изделий, в пищевой промышленности — для стерилизации продуктов, в медицине — для *лучевой терапии*, для «бескровной хирургии» и в ряде др. отраслей.

Ускорители позволяют получать пучки заряженных частиц с энергиями от нескольких  $MэВ$  до нескольких сотен  $ГэВ$ . Интенсивность пучков достигает  $10^{16}$  частиц в секунду, причем эти пучки можно сфокусировать на мишени площадью в несколько квадратных миллиметров. В качестве "первичных снарядов" чаще всего используются протоны и электроны.

Только с помощью ускорителей можно решать такие задачи, как получение новых частиц или новых состояний экспериментально уже открытых частиц, а также исследовать детально структуру субатомных объектов. Высокие энергии нужны не только для получения новых состояний. Они необходимы также и для выяснения деталей уже открытых, субатомных объектов. Легко видеть, что энергия частиц, используемых для исследования все более мелких деталей ядер и частиц, должна возрастать. Действительно, дебройлевская длина волны частицы с импульсом  $P$  равна  $\lambda = h/P$ . Часто используют приведенную дебройлевскую длину волны  $\lambda = \hbar/P$ ,  $\hbar = h/2\pi$ . Чтобы различить структурные детали объекта с линейными размерами порядка  $d$ , должны использоваться длины волн, сравнимые с  $d$  или меньше  $d$ :  $\lambda \leq d$ . Иначе говоря, требуются частицы с импульсом  $P$ . Чем меньше детали объектов, которые мы хотим рассмотреть, тем, следовательно, выше должны быть значения импульсов, а потому и энергий. Ускорители заряженных частиц можно классифицировать по разным признакам. По типу ускоряемых частиц различают электронные ускорители, протонные ускорители и ускорители ионов.

По характеру траекторий частиц различают линейные ускорители (точнее, прямолинейные ускорители), в которых траектории частиц близки к прямой линии, и циклические ускорители, в которых траектории частиц близки к окружности (или спирали).

По характеру ускоряющего поля ускорители делят на резонансные ускорители, в которых ускорение производится переменным высокочастотным электромагнитным полем и для успешного ускорения

частицы должны двигаться в резонанс с изменением поля, и нерезонансные ускорители, в которых направление поля за время ускорения не изменяется.

Чтобы достичь очень высоких энергий, частицу необходимо подвергнуть многократному ускорению. Наиболее простой по замыслу системой для этого является линейный ускоритель. В линейных ускорителях электронов скорость электронов приближается к скорости света.

Существенная часть циклотрон – две полые металлические коробки, называемые дуантами

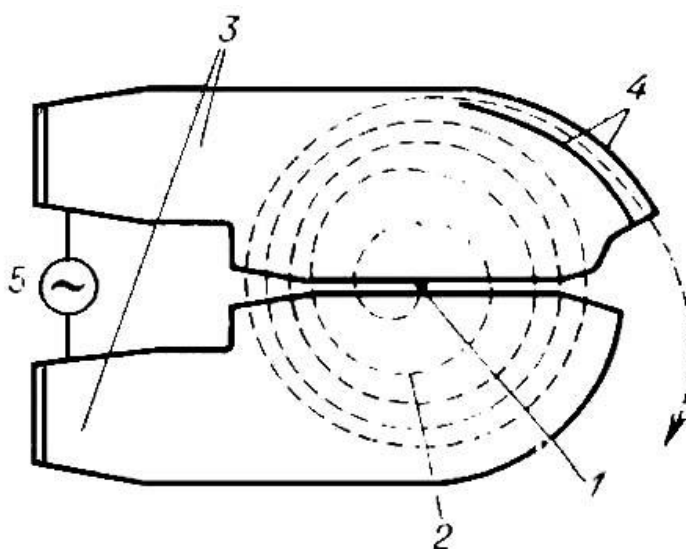


Рис. 6.1. Схема движения частиц в циклотроне; магнитное поле перпендикулярно плоскости чертежа. 1 — ионный источник; 2 — орбита ускоряемой частицы (спираль); 3 — ускоряющие электроды; 4 — выводное устройство (отклоняющие пластины); 5 — источник ускоряющего поля (Рисунок взят из Большой Советской Энциклопедии [Электронный ресурс], URL — <mailto:http://bse.sci-lib.com/>).

Дуанты немного раздвинуты по диаметру друг от друга и подключены к радиочастотному генератору, работающему на частоте порядка нескольких мегагерц. Дуанты помещают в вакуумное пространство между полюсами мощного магнита, который создает магнитное поле с индукцией до нескольких Тл. Траектория частицы внутри дуантов образует некоторую раскручивающуюся спираль. Ускорение продолжается до некоторого

максимального радиуса. После этого частицу вывозят из циклотрона и направляют на мишень.

Максимальная кинетическая энергия частицы, когда она покидает циклотрон, равна

$$K = \frac{1}{2} m v_{max}^2 = \frac{1}{2} \frac{q^2 B^2 r_{max}^2}{m}.$$

При  $r=0,5$  м конструктивные параметры циклотрона, предназначенного для ускорения  $\alpha$ -частиц до энергии 20 МэВ, следующие:

$$B = \left( \frac{2mK}{q^2 r^2} \right)^{\frac{1}{2}} = 1,3 \text{ Тл} \quad f = \frac{q}{m} \frac{B}{2\pi} = 9,9 \text{ МГц}$$

Бетатрон предназначен специально для ускорения электронов. После того, как электрон прокрутится много раз на орбите и получит нужную энергию, магнитное поле изменяют и заставляют электрон удариться о мишень. Серийный бетатрон на 100 МэВ имеет диаметр полюсов около 2 м и магнит массой 130 т. Электронам сообщается энергия 100 МэВ порциями по 420 эВ на каждом обороте, так что всего ускоряемый электрон совершает  $2,4 \cdot 10^5$  оборотов, т.е. пробегает расстояние около 1280 км.

Верхний предел, получаемых на бетатроне энергий, ограничивается на двумя факторами. Во-первых, так как электроны разгоняются до скоростей, близких к скорости света, становятся важными релятивистские эффекты и дальнейшее увеличение скорости электрона не происходит. Во-вторых, поскольку электроны - заряженные частицы и так как они двигаются по круговым орбитам, т.е. постоянно ускоряются, то они должны терять энергию на излучение.

Синхротрон – это вариант бетатрона, в котором скомпенсированы релятивистские эффекты.

Ускорители на встречных пучках, или ускорители со встречными пучками, установки, в которых осуществляется столкновение встречных пучков заряженных частиц (элементарных частиц и ионов), ускоренные электрическим полем до высоких энергий. На таких установках исследуются

взаимодействия частиц и рождение новых частиц при максимально доступных в лабораторных условиях эффективных энергиях столкновения. Из расчёта следует, что при столкновении двух частиц одинаковой массы  $m_0$ , одна из которых покоится в лабораторной системе отсчёта, а другая движется с релятивистской (близкой к скорости света  $c$ ) скоростью, энергия в системе центра инерции  $E_{ц.и.} = \sqrt{2E_0E}$ , где  $E_0 = m_0c^2$  – энергия покоя частицы, а  $E$  – энергия налетающей частицы в лабораторной системе отсчёта. Таким образом, чем больше  $E$ , тем меньшая её доля определяет энергию взаимодействия частиц. Если же сталкиваются частицы с равными по величине и противоположно направленными импульсами, т. е. их суммарный импульс равен нулю, то лабораторная система отсчёта совпадает с системой центра инерции частиц и эффективная энергия столкновения равна сумме энергий сталкивающихся частиц; для частиц с одинаковыми массами (и энергией  $E$ )  $E_{ц.и.} = 2E$ , т. е. кинетическая энергия может быть полностью использована на взаимодействие [1].

### 1. Заполнить таблицу «Крупнейшие линейные ускорители»

Местонахождение	Год запуска	Максимальная энергия, МэВ	Длина, м	Длина импульса ускоряемых частиц, мксек	Максимальный средний ток, мка	Максимальный ток в импульсе, ма
<b>Электронные</b>						
Харьков (Украина)						
Станфорд (США)						
<b>Протонные</b>						
Серпухов (Россия)						
Батейвия (США)						
Лос - Аламос (США)						

### 2. Заполнить таблицу «Крупнейшие циклические ускорители»

Местонахождение	Максимальная энергия, ГэВ	Диаметр установки, м	Сечение камеры, см	Тип инжектора	Энергия инъекции, МэВ	Год запуска
<b>Синхрофазотроны</b>						
Дубна (Россия)						
Аргонн (США)						
Женева (Швейцария)						
Брукхейвен (США)						
Серпухов (Россия)						
Батейвия (США)						
<b>Синхротроны</b>						
Дарсбери (Великобритания)						
Ереван (Армения)						
Гамбург (ФРГ)						
Корнелл (США)						
<b>Фазотроны</b>						
Женева (Швейцария)						
Дубна (Россия)						
С. Петербург (Россия)						

**Темы докладов:**

1. Электростатический генератор Ван де Граафа;
2. Линейный ускоритель;
3. Циклотрон;
4. Бетатрон;
5. Синхротрон;
6. Оптика пучков частиц;
7. Встречные пучки;

## 8. Большой адронный коллайдер - LHC (Large Hadron Collider).

### 2.4. Методические рекомендации

В течение курса учащиеся посещают лекционные и практические занятия, где у них есть возможность изучить материал, закрепить его, получая консультации учителя. По мере прохождения материала курса учащиеся получают собственные продукты информационной деятельности.

Учащимся предоставляется возможность использовать информационные ресурсы (учебные пособия, дополнительную литературу, Internet-ресурсы) для детального изучения материала.

В процессе освоения курса учащиеся осваивают теоретический материал посредством лекции с элементами беседы, выполняют практические работы.

Итоговым результатом прохождения курса является проект – модель, над которым учащиеся работают в течение всего курса как индивидуально, так и в малых группах (2-4 человека). При проведении элективного курса реализуется проектный метод обучения. Таким образом, личностно-ориентированный подход при изучении этого курса реализуется за счет индивидуального выбора тематики проекта, индивидуального темпа выполнения индивидуального проекта. Итоговым результатом прохождения курса является проект-модель учащихся. Методические рекомендации учащимся:

1. Начните с выбора людей в свою команду (не более 4-х в одной).
2. Составьте план работы.
3. Изучите теоретическую часть работы, используя свои конспекты, учебную и дополнительную литературу.
4. Изучите программную среду Scilab (Приложение А).
5. Создайте модель физического явления в программной среде.
6. Свой отчет оформите в виде презентации.
7. Подготовьтесь для защиты на конференции.

## 2.5. Список литературы

*Для учителя:*

1. Бурштейн. Э. Л. Ускорители заряженных частиц //Вологодская областная универсальная научная библиотека [Электронный ресурс] , URL— [Ускорители заряженных частиц](#)
2. Гинзбург В. Л. Космические лучи: 75 лет исследований и перспективы на будущее // Земля и Вселенная. — М.: Наука, 1988. — № 3. — С. 3—9.
3. Логинов В. М., Ускорение и диффузия заряженной частицы в осциллирующем электрическом поле со случайно прыгающей фазой//Прикладная физика. 2017. No1.С. 9—13.
4. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей. – М.: Университетская книга, 2011.

*Для учеников:*

1. Журнал «Квантик» для любознательных [Электронный ресурс], URL — [«Квантик»](#)
2. Научный журнал по физике «Ядерная физика» [Электронный ресурс] , URL — [«Ядерная физика»](#)
3. Научный журнал по физике «Физика плазмы» [Электронный ресурс], URL — [«Физика плазмы»](#)
4. Baudin M., Введение в Scilab [Электронный ресурс], URL — [Введение в Scilab](#)



## Заключение

Основные выводы, которые мы сделали в процессе исследования следующие:

- вводить обучение по направлениям (профилям) следует после того, как школьники получат базовое физическое образование и утвердятся в своих склонностях, для этого требуется введение факультативов;
- на старшей ступени обучения следует обеспечить возможно большее количество направлений (профилей) обучения;
- разработка элективных курсов является важной задачей современного образования, так как данный вид курсов позволяет учитывать различные интересы школьников, выбравших определенный профиль.

В предложенном элективном курсе учтены выявленные в процессе исследования требования к разработке элективных курсов. Данный элективный курс оформлен в соответствии с выявленными требованиями [17] к оформлению элективных курсов. Он содержит:

- пояснительную записку;
- содержание;
- тематическое планирование;
- методические рекомендации;
- список литературы.

В процессе исследования были решены все поставленные задачи:

- проанализирована научно - методическая литература и требования по разработке элективных курсов;
- проведен анализ учебной и научной литературы по теме «Стохастическое ускорение»;
- рассмотрены основные механизмы стохастического ускорения заряженных частиц;
- проведен обзор программного продукта открытого типа Scilab для моделирования;

- разработана школьная лекция по теме «Механизмы ускорения Ферми»;

- представлен план проведения экскурсии в город Железногорск (Горно-химический комбинат и «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф.Решетнёва»).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что задачи исследования решены, цель исследования – разработка элективного курса по теме «Стохастическое ускорение», достигнута,

Материалы дипломной работы могут быть использованы студентами - практикантами, учителями физики, для возможной доработки и внедрения данного курса в практику школ физического профиля.

## Список использованной литературы и источников

1. Бурштейн. Э. Л. Ускорители заряженных частиц // Вологодская областная универсальная научная библиотека. URL: <mailto:http://www.booksite.ru/fulltext/1/001/008/114/616.htm>
2. Гаспржака А. Г. Элективные курсы в профильном обучении // сост.– М.: Вита-Пресс, 2004. – С. 144.
3. Гинзбург В. Л. Космические лучи: 75 лет исследований и перспективы на будущее // Земля и Вселенная. — М.: Наука, 1988. — № 3. — С. 3—9.
4. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Современное состояние вопроса о происхождении космических лучей // УФН. — 1960. — № 7.— С. 411—469. — ISSN 1996-6652. — URL: <mailto:http://ufn.ru/ru/articles/1960/7/b/>
5. Дорман Л.И. Экспериментальные и теоретические основы астрофизики космических лучей. — М.: Наука, 1975. — С. 464.
6. Карась В. И., Алисов А. Ф., Артамошкин А. М.// Вопросы атомной науки и техники, сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2006. No5. С. 54.
7. Космические лучи// Физическая энциклопедия/ Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1990. — Т. 2. Добротность — Магнитооптика. — С. 471-474.
8. Логинов В. М., Ускорение и диффузия заряженной частицы в осциллирующем электрическом поле со случайно прыгающей фазой//Прикладная физика. 2017. No1. С. 9—13.
9. Лытова М. Ф., Остряков В. М. Физика космической плазмы. Ускорение тяжёлых ионов: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. 108 с. — URL: <mailto:http://www.phtf.spbstu.ru/files/Posobie.pdf>
10. Мирошниченко Л. И. Физика Солнца и солнечно-земных связей. — М.: Университетская книга, 2011.
11. Полещук В. А., Полещук А. С. Особенности элективных курсов и их влияние на профессионализацию // Научно-методический электронный

журнал «Концепт». – 2015. – Т. 26. – С. 46–50. – URL: <mailto:http://e-koncept.ru/2015/95294.ht>

12. Птицина К. В., Троицкий С. В. Физические условия в потенциальных ускорителях космических лучей сверхвысоких энергий: обновлённая диаграмма Хилласа и ограничения из потерь на излучение // УФН. 2010. Т. 180. №7. С. 723.

13. Тематическое приложение к журналу «Вестник образования» // Профильное обучение. Часть 1 / Министерство образования и науки РФ. – М.: Просвещение, 2004. - №4 – С.139.

14. Тропин И.С. Численные и технические расчеты в среде Scilab (ПО для решения задач численных и технических вычислений): Учебное пособие. — Москва: 2008. — С. 65.

15. Файнберг Я.Б., Басс Ф.Г., Шапиро В.Д. Квазилинейная теория слаботурбулентной плазмы с учетом корреляции электрических полей // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1965, т.49, вып.1 (7), С. 329—334.

16. Файнберг Я.Б. Плазменная электроника и плазменные методы ускорения заряженных частиц // Физика плазмы. 2000, т.26. с.362-369.

17. Элективные курсы в профильном обучении // Министерство образования РФ –Национальный фонд подготовки кадров. – М.: Вита – Пресс, 2004. – С. 144.

*Обзор пакета Scilab*

Программный пакет Scilab объединяет в себе развитый язык программирования и обширную библиотеку численных алгоритмов, охватывающую многие области научных и технических вычислений. С 1994 года распространяется вместе с исходным кодом через Интернет.

Язык программирования Scilab относится к числу интерпретируемых языков высокого уровня, предоставляя пользователю возможность напрямую манипулировать математическими конструкциями, такими как матрицы или полиномы. Тем самым достигается большая скорость и простота написания программ. Язык Scilab допускает расширение посредством определения пользовательских типов данных. При этом стандартным операциям, например, арифметическим операторам или операторам сравнения, возможно придать особый смысл применительно к пользовательским типам данных. Пользователи пакета могут разрабатывать собственные модули расширения для решения конкретных задач. Возможен также вызов из Scilab функций, реализованных на других языках программирования, в частности Fortran или C, благодаря чему сторонние библиотеки могут быть использованы, как если бы они были частью встроенных средств пакета. Scilab также предоставляет возможности для взаимодействия с программным комплексом LabVIEW компании National Instruments, предназначенным для визуального проектирования измерительных систем, а также сбора и анализа экспериментальных данных.

Разрабатываемый в соответствии с принципами свободного программного обеспечения, Scilab распространяется бесплатно на основе лицензии Cecill. Дистрибутив Scilab включает исходный код, поэтому заинтересованный пользователь может самостоятельно исследовать внутреннее устройство пакета и особенности его работы. Скомпилированные

версии пакета Scilab доступны для операционных систем Windows, Linux и Mac OS. Справочная документация переведена на многие языки мира [40].

Scilab предоставляет чрезвычайно богатый набор средств для научных и инженерных расчетов. Хотя первоначальный акцент при разработке пакета был сделан на матричную алгебру, вскоре функциональные возможности расширились настолько, что охватили большинство разделов научных вычислений, включая:

1. линейную алгебру и разреженные матрицы,
2. полиномы и рациональные функции,
3. интерполяцию и аппроксимацию,
4. линейную, квадратичную и нелинейную оптимизацию,
5. обыкновенные дифференциальные уравнения, дифференциально — алгебраические уравнения,
6. классическое и робастное управление, решение линейных матричных неравенств,
7. оптимизацию дифференцируемых и недифференцируемых функций,
8. обработку сигналов,
9. математическую статистику.

Кроме того, Scilab содержит значительное число функций для построения графиков, а также мощное средство визуального моделирования Xcos, которое объединяет в себе возможности редактора моделей и симулятора. Отличия от некоторых коммерческих программ:

1. Бесплатность.
2. Свободность (с версии 5.0).
3. Маленький размер — дистрибутив 4 версии занимал менее 20 МБ против более чем двухгигабайтного пакета MATLAB. Инсталлятор 5 версии (5.4.1) увеличился в объёме до 117 МБ.
4. Возможность запуска в консоли без использования графического интерфейса, в том числе в версии под Windows (в UNIX и Windows версиях

MatLab—а эта возможность присутствует тоже). Это позволяет производить автоматизированные вычисления, есть пакетный режим [14].

### *Как получить дистрибутив и установить Scilab*

Дистрибутивы, содержащие исполняемые файлы для каждой из поддерживаемых платформ (Windows, Linux и Mac OS), доступны на домашней странице Scilab:

<mailto:http://www.scilab.org>

а также в разделе Download:

<mailto:http://www.scilab.org/download>

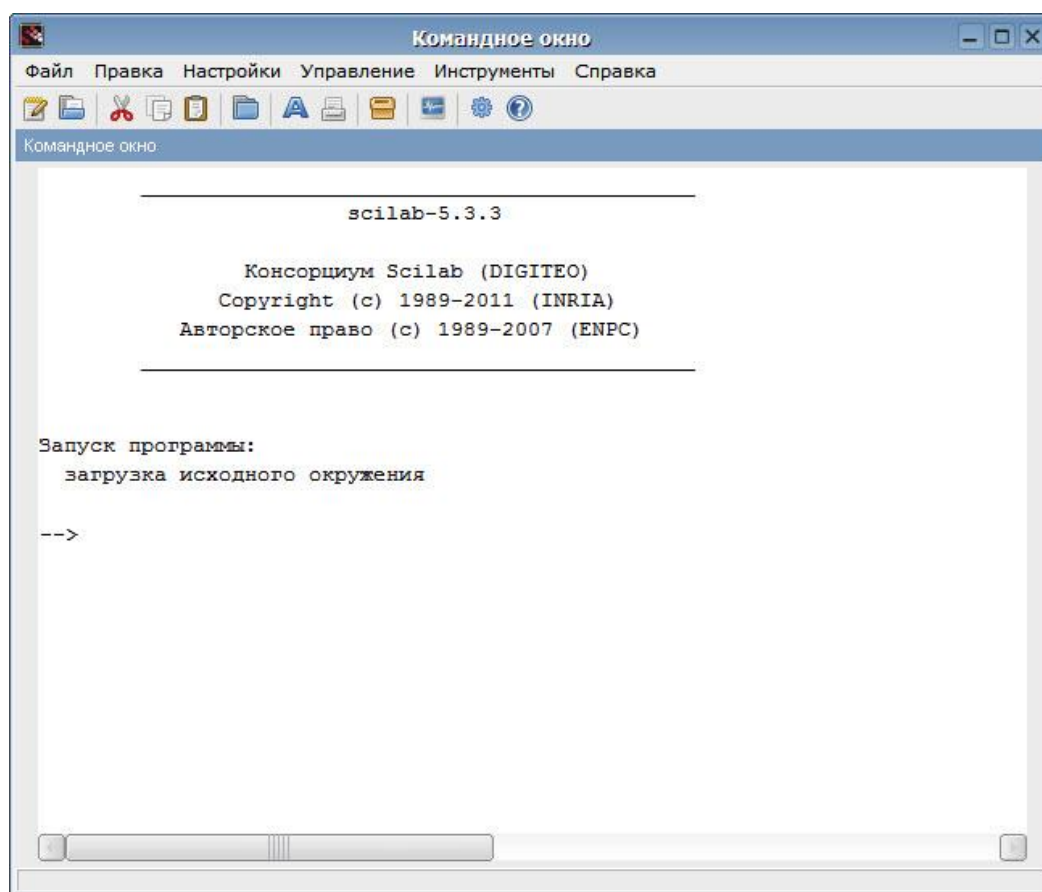


Рис. 12. Консоль Scilab в ОС Windows (Рисунок взят книги Michaël Baudin Введение в Scilab).

Предлагаются версии для 32- и 64-битовых платформ. Scilab также может быть загружен в форме исходных кодов и скомпилирован пользователем самостоятельно. Самостоятельная компиляция будет интересна в том случае, если пользователь желает более подробно

ознакомиться с особенностями внутреннего функционирования Scilab, а также при необходимости отладки или добавления новых возможностей. Для компиляции Scilab понадобятся дополнительные файлы, которые также можно загрузить в разделе Download. Кроме того, потребуется компилятор Fortran или C. Инструкции по компиляциям можно найти в разделе "Compilation of Scilab" wiki-энциклопедии Scilab, размещающейся по адресу:

<http://wiki.scilab.org>

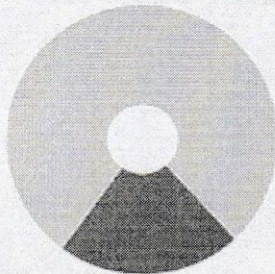




АНТИПЛАГИАТ



Дила  
Бесплатный доступ (0/0). Баланс: 0  
Модуль поиска Интернет



О документе

Оригинальность: 77.88%

Занятость: 22.12%

Цитирование: 0%

Дата: 25.06.2017

Источников: 18

В кабинет ВКР АШУРБАЕВА Д.К..docx

В кабинет

История отчетов | Выгрузить .arx | Выгрузить .pdf | Краткая информация | Версия для печати | Руководство

№	%	Источники	Ссылка	Дата	Найдено в
[2]	10.35%	Создание элективного курса по физике "Альтернативная электроэнергетика"	<a href="http://knowledge.albest.ru">http://knowledge.albest.ru</a>	раньше 2011 года	Модуль поиска Интернет
[3]	4.8%	План элективные курсы по физике и их роль в организации профильного и предпрофильного обучения Электронные курсы в условиях профильного обучения «Место, свободное от стандарта»	<a href="http://do.gedocs.ru">http://do.gedocs.ru</a>	14.08.2016	Модуль поиска Интернет
[1]	10.41%	Дипломная работа: Создание элективного курса по физике "Альтернативная электроэнергетика" - BestReferat.ru - Банк рефератов, дипломы, курсовые работы, сочинения, доклады	<a href="http://bestreferat.ru">http://bestreferat.ru</a>	раньше 2011 года	Модуль поиска Интернет

Еще найдено источников - 15, заимствования - 11.75%

Получить полный отчет

О системе | Товарный знак | Новости | Контакты | Вакансии



Пользовательское соглашение | Report Viewer | Помощь

В.М.Костин



## **Отзыв руководителя выпускной квалификационной работы**

*Институт математики, физики, информатики*

*Кафедра: Теории и методики обучения физике*

*Студент: Ашурбаева Дилафза Кахраманбековна*

*Группа: 53*

*Руководитель: Логинов В.М. доктор физ.-мат.наук, проф. кафедры ТиМОФ*

*Тема ВКР: Разработка элективного курса для учащихся старших классов по теме «Стохастическое ускорение»*

*Оценка соответствия подготовленность студента требованиям ГОС:*

*Содержание ВКР и уровень её выполнения студентом говорят о соответствии уровня подготовки студента требованиям ГОС ВПО.*

*Достоинства ВКР:*

*Привлечение интереса школьников к изучению физики имеет огромное значение для развития нашей страны в 21 веке. Важную роль в решении задачи играет профильное обучение. Одним из инструментов привлечения внимания являются элективные курсы, посвященные актуальным разделам современной физики. В обсуждаемой ВКР Ашурбаевой Д.К. разработан элективный курс для учащихся старших классов по теме «Стохастическое ускорение». Понимание механизмов ускорения космических лучей в межзвездной среде, в лабораторной плазме представляет фундаментальный и практический интерес. Структура, содержание и требования разработаны в соответствие со стандартами, предъявляемыми к подобным курсам. Курс содержит 6 тем:- «Механизмы Ферми», «Турбулентное ускорение», «Ускорение ударными волнами», «Ускорение в солнечной плазме», «Нагрев частиц», «Механизмы ускорения заряженных с помощью различных ускорителей». При разработке тем Ашурбаевой Д.К. проделана большая работа по отбору и компоновке материала, формулировке тем самостоятельной работы, включая проекта для имитационного моделирования в среде Scilab стохастического нагрева нерелятивистской заряженной частицы в поле плоской волны со случайно прыгающей фазой. Материал сложный для адаптации к школьному курсу, но Ашурбаева Д.К. успешно справилась с предложенной выпускной квалификационной работой.*

*Замечания и недостатки:*

*Существенных замечаний по выполненной работе не имеется.*

Заключение:

*Выпускная квалификационная работа студентки Ашурбаевой Д.К. соответствует требованиям к ВКР по направлению подготовки 44.03.05 Педагогическое образование, профиль Физика и информатика и заслуживает оценки «отлично».*

Руководитель



*(В.М.Логинов)*

«23» июня 2017 г.

Согласие  
на размещение текста выпускной квалификационной работы  
обучающегося в ЭБС КГПУ им. В.П. Астафьева

Я, Ашурбаева Дилафза Кахраманбековна

(фамилия, имя, отчество)

разрешаю КГПУ им. В.П. Астафьева безвозмездно воспроизводить и размещать (доводить до всеобщего сведения) в полном объеме и по частям написанную мною в рамках выполнения основной профессиональной образовательной программы выпускную квалификационную работу бакалавра / специалиста / магистра / аспиранта

(нужное подчеркнуть)

на тему: Разработка элективного курса для учащихся старших классов по теме «Стохастическое ускорение»

(название работы)

(далее - ВКР) в сети Интернет в ЭБС КГПУ им. В.П. Астафьева, расположенном по адресу <http://elib.kspu.ru>, таким образом, чтобы любое лицо могло получить доступ к ВКР из любого места и в любое время по собственному выбору, в течение всего срока действия исключительного права на ВКР.

Я подтверждаю, что ВКР написана мною лично, в соответствии с правилами академической этики и не нарушает интеллектуальных прав иных лиц.

26.06.2017

дата

  
\_\_\_\_\_

подпись