

## **НАУЧНАЯ ПРОГРАММА**

### **V Астрофизической школы «Траектория» им. О.В. Верходанова второго набора**

#### **Общие положения**

1. В программе V Астрофизической школы «Траектория» им. О.В. Верходанова второго набора (АФШ) основное внимание уделяется астрофизике, астрономии, физике, математике.
2. Занятия проводятся в нескольких учебно-методических форматах: в виде лекций, практических занятий, наблюдений.
3. Лекции могут носить как учебный, так и общеобразовательный характер.
4. Практические занятия проводятся опытными педагогами.
5. Наблюдения осуществляются под руководством ведущих российских и зарубежных ученых-астрофизиков.
6. В процессе подготовки АФШ в настоящей программе возможны изменения (в том числе вызванные неблагоприятными для проведения наблюдений погодными условиями), касающиеся лекций, практических занятий, наблюдений.

#### **I. Астрофизика**

##### **1. Введение в специальную теорию относительности: нешкольный мир**

На лекции будет дано представление о релятивистском подходе к описанию пространства-времени. Принцип относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Релятивистские эффекты замедления времени и сокращения расстояний. Энергия покоя.

##### **2. Введение в квантовую механику: мир волн и частиц**

Экспериментальные предпосылки квантовой теории. Опыты Томпсона и Дэвисона. Длина волны де-Бройля и соотношения Планка-Эйнштейна. Представление о фотонах. Волновая функция и её физический смысл. Уравнение Шредингера.

##### **3. Процессы излучения в релятивистской астрофизике**

В лекции даётся краткий обзор процессов генерации и преобразования излучения в астрофизике высоких энергий: магнитотормозное излучение, синхротронное излучение, прямой и обратный комптоновский эффекты. Свойства этих механизмов и их реализация в различных астрофизических источниках.

##### **4. Релятивистская астрофизика: что это такое и о чём**

С самого своего рождения теория относительности тесно связана с астрономией. Те скорости и те гравитационные поля, при которых начинает работать эйнштейновская физика, намного проще наблюдать в космосе, чем создать в лаборатории. В двадцатом веке релятивистская астрофизика оформилась как отдельная дисциплина, изучающая самые экстремальные объекты во вселенной – пульсары, черные дыры, релятивистские струйные выбросы и прочее. Мы поговорим о том, как родилась эта наука, как космос бросает вызов воображению астрономов, как оценивать важность релятивистских эффектов и как изучать черные дыры, не зная теории относительности.

##### **5. Черные дыры**

Парадоксально, но представление о черной дыре, в общих чертах верное с точки зрения астронома-наблюдателя, намного старше теории относительности. В ньютоновской физике можно представить себе звезду, вторая космическая скорость на поверхности которой превосходит скорость света. Такой объект исчезнет со звездных карт и радаров космических кораблей, но останется источником поля тяготения. Для современной науки черные дыры – это и космические объекты, во множестве

наблюдаемые во всех диапазонах электромагнитного спектра, и предмет фундаментальных споров о причинности и потере информации.

## **6. Первые три минуты**

Материал лекции включает описание основных событий во Вселенной, начиная с разогрева Вселенной после завершения инфляции до закалки нейтрино и нейтронов. Сюда входит также описание трех фазовых переходов Вселенной (GUT, электрослабый и конфайнмент кварков) и ряд вопросов, связанных с природой и эволюцией темной материи. В основе изложения лежат космологические уравнения Фридмана, со знакомства с которыми и начинается лекция.

## **7. От нуклеосинтеза до рекомбинации**

Лекция является непосредственным продолжением лекции «Первые три минуты» и посвящена преимущественно двум близко связанным темам, относящимся к возникновению основных структурных уровней материи – атомных ядер и атомов (рекомбинация электронов) – в ходе температурной истории Вселенной. Оба эти процесса объединены похожей физикой, поэтому их удобно рассматривать вместе. В лекции предполагается также рассказать о начальных фазах роста космологических возмущений и особой роли в этом процессе темной материи и рекомбинации электронов.

## **8. Общая теория относительности**

Создание общей теории относительности – замечательный пример того, что мы теперь называем стартапом. Блестящая, но первоначально совершенно не очевидная идея (гравитация не есть поле, а кривизна пространства-времени), умение найти нужных людей (друг Альберта Эйнштейна Марсель Гроссман рассказал ему о тогда еще совсем молодой науке – дифференциальной геометрии, которая и стала языком ОТО, а Давид Гильберт придал ей окончательный математически-изящный вид) и, тем не менее, десятилетие неудач, которые удалось пройти лишь благодаря исключительному упорству в достижении цели – обо все этом и пойдет речь в предлагаемой лекции. При этом она будет иметь два уровня: элементарный, доступный любому старшекласснику, а также продвинутый – для тех, кто знаком с производными.

## **9. Радиопульсары**

История радиопульсаров – печальный пример научной неудачи. Несмотря на уже полвека активных наблюдений и теоретических исследований, мы до сих пор не знаем механизм, ответственный за наблюдаемое радиоизлучение. Тем не менее, радиопульсары уже много лет справедливо называют лабораторией современной физики. Электродинамика, квантовая физика, общая теория относительности – все эти явления открываются в радиопульсарах совершенно неожиданными гранями. Поэтому неудивительно, что изучение радиопульсаров уже привело к большому количеству замечательных открытий, о которых и будет подробно рассказано.

## **10. Рентгеновские двойные**

Рентгеновские двойные – самые яркие и одни из самых интересных объектов рентгеновского неба. Источником их излучения служит аккреция вещества, поставляемого нормальной звездой на компактный объект, который может быть нейтронной звездой, черной дырой или даже белым карликом (хотя такие двойные обычно называют катаклизмическими переменными). В лекции мы поговорим об аккреции, кратко обсудим основные типы и свойства рентгеновских двойных, и, наконец, о том, что можно узнать о нейтронных звездах и черных дырах из наблюдений.

## **18. Космология: рождение Вселенной**

В лекции дается краткий обзор проблем Стандартной космологической модели, которые привели к созданию инфляционной космологии, будут обозначены основные идеи и особенности инфляционной модели, а также освещены конкурирующие представления о ранней Вселенной.

## **19. Космология. Формирование структуры**

В лекции будет обсужден ключевой вопрос о процессах формирования структур разного масштаба в ранней и в современной Вселенной. В общепринятой лямбда-CDM модели темная (холодная) материя гравитационно доминирует на всех масштабах, больших, чем ядра галактик. Сейчас мы живем на стадии доминирования темной энергии, которая была предложена в качестве объяснения ускоренного расширения Вселенной, обнаруженного в исследовании сверхновых SN1a. Обзоры всего неба дают основные данные по крупномасштабной структуре распределения видимой материи от групп до сверхскоплений галактик. Мы также обсудим некоторое напряжение, возникшее в определении космологических параметров (например, постоянной Хаббла) в данной модели и в астрофизических наблюдениях.

## **20. Космология. Наблюдения**

В этой лекции будут обсуждены эксперименты, которые превратили космологию в точную науку. В первую очередь, это чувствительные радиообзоры неба на космических аппаратах COBE, WMAP, PLANCK, в которых последовательно были обнаружены: постоянство термодинамической температуры (реликтового) микроволнового фона (РИ), 2.725K, флуктуации РИ на всех угловых масштабах, вплоть до пяти угловых минут на уровне ниже 30 микроК и поляризация РИ. Осудим поиск и применение таких "стандартных" свечей как SN1a для обнаружения ускоренного расширения Вселенной. И рассмотрим текущие крупные радиопроекты, например, SPT, ACT, VICEP. Попробуем спрогнозировать, сможет ли космический ИК-телескоп Webb получить новые ключевые данные по космологии ранней Вселенной.

## **21. Космические лучи**

Физика высоких энергий в атмосфере (НЕРА) в последнее десятилетие претерпевает глубокую трансформацию. Коррелированные измерения потоков частиц, модулированных сильными атмосферными электрическими полями широкополосных волн от атмосферных разрядов, оптического излучения в нижних слоях атмосферы, а также регистрация различных метеорологических параметров на земной поверхности (включая приповерхностное электрическое поле) вознаграждается лучшим пониманием очень сложных процессов в грозовой атмосфере. Синергия космических лучей и физики атмосферы привела к развитию моделей происхождения всплесков частиц, регистрируемых на земной поверхности, вертикального профиля сильного электрического поля в нижних слоях атмосферы, эффекта торможения мюонов, взаимосвязи потоков частиц и вспышки молний, циркуляции потомков радона и др. На лекции мы изучим установки и полученные с их помощью результаты, которые обеспечат возможности для дальнейшего развития НЕРА, открывая новые области исследований и связывая разные отрасли науки для понимания физики геопространства.

## **II. Физика**

Основы СТО, ОТО и квантовой теории. Преобразования Лоренца и их следствия. Геометрическое описание тяготения, метрика, основные наблюдаемые следствия ОТО. Фотоны как кванты света, соотношения Планка-Эйнштейна, корпускулярно-волновой дуализм, квантовое вырождение, проблема построения квантовой теории гравитации.

Решение задач.

## **III. Математика**

Скаляр, вектор, тензор. Многомерные пространства и метрика. Дифференциальные уравнения и проч. Операторы.

Решение задач.

## **IV. Лекции**

## **1. От самого первого момента к настоящему времени**

Большой взрыв около 13,8 миллиардов лет назад считается началом нашей Вселенной. Вселенная, вначале бесконечно горячая и плотная, через 1 секунду уже представляет собой море нейтронов, протонов, электронов, позитронов, фотонов и нейтрино. Спустя 100 миллионов лет сформировались самые первые звезды. Ни одна из звезд первого поколения не смогла просуществовать до настоящего времени. Эти звезды зачастую были в миллион раз массивнее сегодняшнего Солнца; они привели к образованию углерода и кислорода, которые стали основой для синтеза элементов, которые мы наблюдаем сегодня во Вселенной. Сигнал о слиянии двух нейтронных звезд в виде гравитационных волн мы получили пять лет назад от события, которое произошло 132 миллиона лет назад.

В ходе лекции мы будем говорить о том, что мы знаем и чего не знаем о рождении и смерти звезд и следах, которые они оставили.

## **2. Гамма-всплески**

Гамма-всплески были случайно обнаружены более 50 лет назад и вызвали огромный резонанс в астрофизической научной среде. В конце 20 века стало ясно, это секундные яркие всплески гамма-излучения – внегалактические источники, расположенные миллиарды световых лет от нас. Огромный выброс энергии за столь ничтожный промежуток времени происходит от короткоживущих релятивистских струй в результате слияния нейтронных звезд или смерти массивных звезд. В этой лекции мы поговорим о физике формирования гамма-всплесков, включая нерешенные проблемы и трудности, с которыми мы сталкиваемся. Мы также обсудим самые последние наблюдательные открытия, связанные с гамма-всплесками, включая первое наблюдение гамма-всплеска одновременно с гравитационно-волновым сигналом и недавнее обнаружение фотонов сверхвысоких энергий от гамма-всплесков.

## **3. Нейтронные звезды**

В лекции будут рассмотрены основные физические свойства и наблюдательные проявления нейтронных звезд – одного из типов компактных звездных остатков. А именно: радиусы и массы нейтронных звезд, магнитные поля и периоды вращения. Внутреннее строение, представление о сверхтекучей нейтронной жидкости.

Нейтронные звезды как источники электромагнитного излучения в максимально широком диапазоне длин волн. Их наблюдательные проявления в двойных системах.

## **4. Экология околоземного космического пространства**

Технические достижения нашей цивилизации сопровождаются определенным негативным влиянием на околоземное пространство. Проблема загрязнения околоземного пространства «космическим мусором» как чисто теоретическая возникла сразу после запуска первого искусственного спутника Земли в 1957 году. С тех пор темпы освоения околоземного пространства очень быстро возрастали. В результате проблема загрязнения околоземного пространства перестала быть только теоретической и трансформировалась в практическую. В лекции рассматриваются основные антропогенные факторы освоения околоземного космического пространства, которые подразделяются на несколько категорий: механические, химические, радиоактивные и электромагнитные загрязнения. Будут рассмотрены темпы загрязнения околоземного пространства в текущий момент и прогноз на ближайшее время, а также методы борьбы с этой проблемой.

## **5. Гравитационные волны**

Гравитационные волны – новый носитель информации об астрофизических процессах, ставший доступным в последние годы. В ходе лекции будут описаны основные источники астрофизических гравитационных волн (в первую очередь – сливающиеся компактные системы). Будет рассказано о методах их детектирования, дополнительно выяснена физическая природа этого явления. Также будет сделан краткий обзор основных результатов гравитационно-волновой астрономии, полученных с 2015 года.

## **6. Джеты**

Джеты – релятивистские выбросы ионизованного вещества. Они сопровождают физические процессы во многих типах объектов, в первую очередь таких, как чёрные дыры (звёздных масс или сверхмассивные). Лекция будет посвящена физике образования джетов при аккреции замагниченного вещества на компактный объект; тем задачам, которые сегодня стоят перед исследователями этого явления, а также наблюдениям джетов.

## **V. Практические работы**

### **I. Определение возраста остатка сверхновой**

Взрыв сверхновой в Галактике – всегда большое событие для астрономов и летописцев! И хотя сам взрыв длится недолго, анализ свойств остатков сверхновых позволят многое узнать о бывшей звезде и ее окружении даже через сотни лет после него. В рамках практического занятия мы познакомимся с основными инструментами анализа изображений и попытаемся измерить скорость расширения остатка сверхновой 1572 г., которую заметил в свое время Тихо Браге.

Наконец, мы поговорим о том, что можно узнать о взрыве на основе этого простого измерения, а также о том, как сделать простое и грубое более сложным и точным с помощью Python.

## **VI. Английский язык**

Разговорный и письменный английский язык в науке. Практические занятия.

## **VII. Практика личностного роста**

Отношения с самим собой – что это?

Как мы видим себя изнутри?

Как воспринимаем реальность вокруг нас?

Что такое теневая сторона нашей личности?

Почему важно стремиться к своей целостности? И что такое – наша целостность?

Как понять, что выбранные нами цели соответствуют нашей природе? Как это проверить?

Как сказать "да" своему выбору? И как сказать "нет", если возникло убеждение в его ошибочности?

Беседы и упражнения на эти темы призваны помочь школьникам определять свои интересы и мотивировать себя развивать их.

## **VIII. Серия «вопросов и ответов»**

## **IX. Круговые занятия по выбору**

### **X. Экскурсии:**

- Бюраканская астрофизическая обсерватория им. В.А. Амбарцумяна
- Nor Amberd Cosmic Ray Research Station
- Институт Candel