

Материалы, присланные руководителями секций Совета.

1 Структура и динамика Галактики.

А.С. Расторгуев

Изучение строения, кинематики и динамики Галактики – традиционное направление исследований в СССР и России начиная с 1930-х годов. Этими проблемами интенсивно занимались и занимаются астрофизики ГАИШ МГУ, СПбГУ, ЮФУ (Ростов-на-Дону), ПФУ (Казань), УФУ (Екатеринбург) и других университетов, а также сотрудники ИНАСАН, ГАО РАН (Пулково), САО РАН. Для исследований используются так наз. «всенебесные» каталоги астрометрических и астрофизических данных, содержащие всевозможные данные для сотен млн и даже млрд звёзд всей небесной сферы.

В рамках этой тематики в России реализованы масштабные программы астрономических наблюдений: многоцветный фотометрический мониторинг цефеид и изучение эволюционной изменчивости периодов их пульсаций (ГАИШ, ИНАСАН); спектральный мониторинг лучевых скоростей цефеид северного неба (ГАИШ, ИНАСАН); фотометрический и спектральный мониторинг Лирид (ГАИШ). Эти объекты являются одними из важнейших «стандартных свечей» во Вселенной. Разработаны оригинальные методы оценки светимостей пульсирующих звёзд, используемых в качестве «стандартных свечей» (ГАИШ).

Разработаны оригинальные методы и реализованы компьютерные алгоритмы изучения кинематики Галактики и её подсистем, такие как метод статистических параллаксов, позволяющий определять полный набор кинематических параметров – кривую вращения диска, параметры спиральной структуры – и одновременно уточнить нуль-пункт шкалы используемых расстояний (ГАИШ, ГАО РАН). Получены важнейшие данные о поглощении света в Галактике (СПбГУ, ГАО РАН, ИНАСАН). Детально исследована популяция шаровых (ЮФУ) и рассеянных (УФУ, ГАИШ, ИНАСАН) скоплений Галактики. Разработаны современные методы изучения неустойчивостей в звёздно-динамических системах (ИНАСАН) и получены важные

данные о природе иррегулярных сил, определяющих динамическую эволюцию звёздных систем (ГАИШ).

Современное и будущее состояние исследований структуры и динамики Галактики и её спутников, а также Местной Группы галактик напрямую связано с функционированием уникальной космической обсерватории GAIA, проводящей астрометрические и астрофизические наблюдения почти 2 млрд звёзд с июня 2014 г. примерно до 2025 г.

Среди перспективных решаемых задач хочется отметить следующие.

1. Использование данных новых и будущих релизов GAIA (DR3-DR5) для детальнейшего изучения кинематики галактических населений. При декларируемой точности параллакс GAIA порядка 10 мксд удастся с относительной точностью порядка 10% исследовать пространственное распределение звёзд в пределах 10 кпк от Солнца.
2. Современная точность собственных движений звёзд (цефеид, рассеянных скоплений, OB-ассоциаций) на уровне 0.04-0.06 мсд/год уже обеспечивает достаточную точность 3D-скоростей для детального исследования кинематики галактического тонкого и толстого диска. Фотометрические расстояния этих объектов всё ещё играют основную роль в определении расстояний.
3. Независимая проверка данных о систематических ошибках тригонометрических параллакс GAIA с использованием фотометрических параллакс «стандартных свечей» и метода статистических параллакс. Разработка Байесовских методов определения расстояний до одиночных и двойных звёзд. Определение масс компонентов двойных звёзд по всей совокупности астрометрических и астрофизических данных.
4. Калибровка светимостей и определение избытков цвета таких «стандартных свечей» как цефеиды и лириды с помощью модифицированного метода Бааде-Весселинка и уточнение зависимостей «период – светимость – металличность» цефеид и лирид с привлечением данных о пересечении полосы неустойчивости цефеид, полученных по эволюционным расчётам и данным об изменчивости

периодов. Уточнение светимостей «стандартных свечей» используемых для определения расстояний до галактик, содержащих Сверхновые разных типов.

5. Построение новых классов моделей самогравитирующих звёздных систем с учётом исследования устойчивостей таких моделей в фазовом пространстве. Изучение физической природы сил, действующих в звёздных системах. Роль фрактальности звёздных систем и релаксация. Исследование нестационарных стадий динамической эволюции.

7. Комплексное исследование звёздных скоплений и OB-ассоциаций с использованием данных GAIA: выделение членов скоплений и ассоциаций, определение расстояний и возрастов. Применение данных многоцветной фотометрии для вывода закона поглощения в направлении на скопления.

8. Изучение законов поглощения по данным многоцветной фотометрии проектов PanSTARRS, IPHAS, VPHAS+, 2MASS, WISE, GAIA и др. и построение 3D-карт поглощения в Галактике.

2 Звезды.

Н.Н.Самусь

Тенденции развития мировой астрономии в свете докладов, представленных на конференции ВАК-2021

Конференция ВАК-2021 рельефно показала, что мировое развитие астрономии неразрывно связано с развитием наземной и космической инструментальной базы. Существенное отставание российской астрономии в инструментальной области – определяющий фактор в том, что мировое развитие астрономии зачастую опирается на зарубежную инструментальную базу. В нашей стране оптический телескоп мирового класса в последний раз был введен в строй (БТА) в 1970-е годы, почти полвека назад.

Наиболее оптимистично на конференции прозвучали результаты, связанные с проектом «Спектр-рентген-гамма» (пленарный доклад акад. Р.А. Сюняева). Эксперимент выявляет значительное количество рентгеновских звезд, большинство из

них – звезды спектрального класса М, в том числе звезды главной последовательности. Представляется, что даже четкое понимание природы их рентгеновского излучения потребует усилий теоретиков. При повторном сканировании того же участка неба, что происходит раз в полгода, обзор выявляет десятки тысяч переменных источников (квазаров и звезд). Ежедневно выявляют 3–5 объектов, поток от которых со времени прошлого скана изменился более чем десятикратно. В других галактиках зафиксированы случаи разрыва звезд сверхмассивными черными дырами. Все эти результаты находятся на мировом уровне и будут определять развитие теории на протяжении десятилетия.

К сожалению, сроки следующего отечественного астрофизического космического эксперимента («Спектр-УФ») уже переносились, и из представленных на конференции ВАК-2021 материалов не создано четкого впечатления о том, какой еще вклад в развитие наших знаний о звездах внесет российская космическая программа. В то же время на декабрь 2021 г. запланирован старт 6.5-м космического инфракрасного телескопа James Webb. Этот проект по важности сравним с космическим телескопом им. Э. Хаббла. Можно ожидать, что результаты проекта определят развитие мировой астрономии на длительный период, в том числе в области исследований звезд.

Роль космических проектов на конференции ВАК-2021 была видна и из других докладов. Так, в докладе А.А. Кузнецова и др. 25 августа были представлены результаты исследования вспыхивающей звезды AT Микроскопа по наблюдениям индийского спутника Astrosat, который работает в широкой полосе от видимой области спектра до дальнего рентгеновского диапазона.

Определенный оптимизм, однако, придает то, что отечественные ученые добиваются результатов мирового уровня, уделяя пристальное внимание традиционным для нашей астрономии объектам исследования, для которых уже накоплено большое количество данных, а уровень их осмысления особенно высок. Так, в докладе акад. А.М. Черепашука (ГАИШ МГУ) и др. говорилось об исследовании уникального объекта SS 433 по наблюдениям на Кисловодской горной обсерватории МГУ с привлечением архивных материалов. По средней кривой блеска затмений 1979–2012 гг. обнаружено отклонение вторичного минимума от фазы 0.5, указывающее на эксцентриситет орбиты $e = 0.05 \pm 0.01$. Выдвинуты новые аргументы

в пользу того, что компактный объект в системе представляет собой черную дыру. Значимость этих результатов весьма высока, несмотря на то, что они относятся к единичному объекту. В других докладах были представлены важные результаты о карликовых новых, о возможной пропущенной классической Новой, предкатаклизмических звездах. Ввиду того, что понимание подобных объектов уже опирается на хорошую астрофизику, такие работы могут привести к существенному углублению понимания процессов в тесных двойных системах с дисками, перетеканием вещества. Е.А. Карицкая (ИНАСАН) и Н.Г.Бочкарев (ГАИШ МГУ) представили новые материалы о системе с нейтронной звездой NZ Геркулеса. В. Крушинский (УрФУ) и др. обнаружили в предкатаклизмической двойной системе GPX-TF16E-48, состоящей из звезды класса K7V и белого карлика и имеющей полуамплитуду лучевых скоростей $K = 178$ км/с, глубокие затмения белого карлика продолжительностью всего в 10 минут.

Перспективы традиционных каталогов переменных звезд, таких как Общий каталог переменных звезд (ОКПЗ) и Международный реестр переменных звезд AAVSO (VSX), были рассмотрены в докладе Н.Н. Самуся (ИНАСАН, ГАИШ МГУ) и др. Сделан вывод, что в будущем от таких каталогов придется отказаться, однако, чтобы избежать многократного дублирования информации, необходимо предусмотреть раздел о переменности блеска в больших звездных каталогах общего назначения, как это уже сделано в каталогах космических миссий Hipparcos и Gaia.

На секциях ВАК-2021 было представлено много работ по звездообразованию, из которых создалось впечатление о наличии большого числа нерешенных проблем в указанной области, имеющей большое значение для понимания звездного состава нашей Галактики и других галактик. Поскольку здесь накоплено немало наблюдательного материала и требуется его теоретическое осмысление, представляется, что отечественные ученые могли бы внести значительный вклад в мировую науку в этой области исследования.

3 Солнце.

А.В. Степанов

I. Космические проекты

А. Интергелиозонд (ИКИ, ИЗМИРАН, Лавочкин и др. рук. Л.М.Зелёный и В.Д.Кузнецов)

Б. Солнечные проекты на МКС

1. **«СОЛНЦЕ-ТЕРАГЕРЦ»**. Регистрация электромагнитного излучения Солнца в ТГц диапазоне для исследования процессов ускорения и взаимодействия заряженных частиц. ФИАН (рук. Махмутов В.С.)

2. **«Тахомаг-МКС»** Тестирование спектромагнитографа и первичные наблюдения быстрых процессов в солнечной атмосфере в условиях отсутствия атмосферных дрожаний. Разрешение 0.46'' и 0,23'', для красной и синей областей спектра. ИЗМИРАН (рук. Обридко В.Н.)

3. **«Кортес»**. Мониторинг короны Солнца с помощью рентгеновского телескопа-спектрометра. ФИАН (рук. Кузин С.В.)

4. **«ГРИС-ФКИ-1»**. Исследование амплитудно-временных спектров гамма, рентгеновского излучения Солнца и фона космического излучения (НИЯУ МИФИ рук. Юров В.Н.)

II. Оптические телескопы

1. Для Национальной Службы Солнца: ngСПОТ - Солнечный патрульный оптический телескоп нового поколения для наблюдений магнитного поля на фотосфере, в хромосферных линиях H α и CaIIK. Предназначение - для прогнозов космической погоды и исследования природы солнечных вспышек, активности фотосферы и хромосферы, выбросов корональной массы, гелиосейсмических процессов. Необходима модернизация телескопов в Уссурийске, Иркутске и Кисловодске и создание нового телескопа в Крыму. Важно расширение станций Службы Солнца для круглосуточного мониторинга: Куба, Боливия.

2. **Телескоп-коронограф с диаметром зеркала 3 м**. Разрабатывается в плане создания Национального Гелиогеофизического Комплекса (ИСЗФ СО РАН, 2025 г.). Вдвое улучшит разрешение (до 50 км на диске Солнца) по сравнению с современным телескопом BBSO 1,6м (США) Сейчас уже запущен DKIST (D = 4,24 м), разрабатывается европейский AST (D = 4м).

Основные научные задачи, стоящие перед современной физикой Солнца

- Понимание процессов, отвечающих за солнечный цикл, включая генерацию и эволюцию магнитного поля (солнечное динамо). Проблемы солнечного климата, вариаций солнечной постоянной.
- Понимание процессов накопления и выделения энергии магнитного поля (вспышки, протуберанцы, корональные выбросы массы), возможность их предсказания и оценка их геоэффективности.
- Механизмы нагрева короны Солнца.
- Механизмы, отвечающих за появление долгоживущих структур: включая корональные дыры, волокна, тонкую филаментацию активных областей и диффузной короны.
- Генерация быстрых и медленных течений в солнечном ветре.
- Природа ускорительных механизмов в атмосфере Солнца и солнечном ветре.
- Солнечно-звёздные аналогии.

4 Межзвездная среда и звездообразование

НГ Бочкарев, ЮА Щекинов

Прорывные результаты рабочей группы

“Физика межзвездной среды”

(Сюда входят результаты по физике окологалактической, межгалактической и других диффузных космических сред)

Список приведен в порядке следования учреждений по долготе с востока на запад

**1. ИМСС УрО РАН, ПНИПИ, П Фрик, В Пипин, Р Степанов,
Физфак МГУ, ИЗМИРАН, ДД Соколов, Р. Аллахвердиев,**

ГАИШ МГУ, М.М. Кацова, И.М. Лившиц,

ИЗМИРАН, В.Н. Обридко,

Систематическое исследование винтового динамо как механизма генерации

магнитного поля в астрофизических джетах. Крупномасштабные магнитные поля большинства небесных тел образуются в результате действия механизма динамо, основанного на эффекте электромагнитной индукции. Однако в зависимости от формы тела конкретная реализация этого механизма может быть различной. Поэтому образование магнитного поля в джетах (закрученных струях) происходит существенно иначе, чем в квазисферических звездах или в галактических дисках.

Выявлена специфика работы динамо в джетах и начато систематическое исследование этого механизма генерации магнитного поля. Задачи этого класса приобретают в последние годы первостепенное значение в связи с детальным исследованием крупномасштабных джетов в окрестности сверхмассивных черных дыр, наблюдаемых в радиогалактиках в режиме радиоинтерференции со сверхдлинными базами, как это было продемонстрировано результатами проекта Спектр-Р (РадиоАстрон).

Предложенный цикл работ представляет собой пионерское направление, которое позволит лучше понять свойства и происхождение этих загаочных объектов.

2. ЧелГУ, УрФУ, СА Хайбрахманов (группа АЕ Дудорова),

Состав: АИ Васюнин, СЮ Парфенов, АМ Соболев (УрФУ)

Исследования возможности поляризационной диагностики остаточного

магнитного поля в аккреционных звездных дисках. Проведена серия численных экспериментов с использованием авторского хемодинамического численного кода, включающего уравнения установившегося МГД-режима и основанный на коде MONACO блок химической кинетики. Целью экспериментов было исследование особенностей пространственного распределения остаточного поля в аккреционных звездных дисках на основе поляризационных наблюдений с помощью зеемановского расщепления спектральных линий молекул CN. В последнее время начаты исследования расширения зеемановской диагностики с помощью более сложных цианидов.

Резюме: Исследования чрезвычайно перспективны для понимания природы магнитных полей протозвезд и звезд. Существенным обстоятельством является объединение

усилий теоретиков и наблюдателей – несомненно перспективных и жизненно важный для МЗС подход. В настоящее время лишь отдельные группы в мире делают попытки измерять зеемановское расщепление линий CN. Теоретические модели в столь явном виде как в публикация группы АЕ Дудоров, СА Хайбрахманов и др, пока отсутствуют. В ближайшее десятилетие предлагаемый подход может стать мощным инструментом для исследования магнитных полей в плотных ядрах молекулярных облаков, протозвезд и аккреционных дисках молодых звезд.

3. УрФУ, АМ Соболев,

Состав: АМ Соболев, СЮ Парфёнов

Исследования быстропеременных динамических явлений и вспышечной активности метанольных мазеров в аккреционных дисках.

1) Алертные наблюдения на Southern Hemisphere Long Baseline Array (LBA) массивной молодой звезды G358.93-0.03 обнаружили во время аккреционной вспышки систему пятен метанольных мазеров класса II, расширяющихся со скоростью 0.04 – 0.08 с. Это явление может означать, что мазеры отслеживают прохождение волны возбуждения через среду высокой плотности, а не физическое движение облаков газа. **2)** Наблюдения вспышечной активности метанольного мазера в окрестности массивной молодой звезды G358.93-0.03 на обсерватории SOFIA подтвердили гигантскую вспышку, наблюдаемую ранее на Гершеле и продемонстрировали возможность временной “развертки” периодов роста аналогичных вспышек с помощью мониторинга. **3)** Алертные наблюдения (Maser Monitoring Organisation – M2O) источника G25.65+1.05 продемонстрировали “супервспышку” – возрастание потока на несколько порядков величины до значений $\sim 10^4$ Ян. Происхождение “супервспышки” связывается с выстраниваем вдоль луча зрения протяженных одно-, двумерных структур – филаментов или слоев с малой относительной лучевой скоростью.

Резюме: Исследования переменности метанольных мазерных источников имеют долгую историю, однако лишь в сравнительно недавнее время появилась возможность наблюдать и исследовать быстропеременные динамические явления в них, в том числе гигантские вспышки яркости (superbursts). Переменность СНЗОН является уникальным индикатором физических условий в областях массивного

звездообразования, поэтому, кроме интересной фундаментальной физики, их исследование дает ключ ко многим “практическим” задачам физики МЗС. В последние годы стал проводиться систематический международный мониторинг таких явлений. Группа УрФУ является в нашей стране лидером этого направления. Их усилия в рамках действующих и будущих международных программ могут привести в ближайшее десятилетие к прорывным результатам мирового уровня.

4. УрФУ, А Васюнин, А Пунанова

Комплексные исследования молекулярного состава в предзвездных ядрах. 1)

Наблюдения молекулярных истечений в окрестности протозвезды малой массы (пример источника NGC1333-IRAS4A) показывают эмиссию в линиях молекул OCS, CS, SO и SO₂. При этом молодые истечения обогащены молекулами OCS, образованными при испарении ледяных частиц, в то время как более старые – эмиссию в молекулах SO₂, характерных для газопазных цепочек. 2) Детальное исследование скоростей молекулярных линий в пылевых филаментах показали наличие крупно-масштабного градиента в продольно и поперечном направлениях на масштабах вплоть до 0.05 пк, что может указывать на аккреционную “подпитку” звездообразующих ядер и ядер протоскоплений. 3) Выявлена корреляция между ориентацией звездообразующих ядер и направлением магнитного поля в близлежащих молекулярных облаках. Корреляция подтверждена в численных моделях и в синтетических наблюдениях. Эти результаты указывают на анизотропный механизм формирования ядер молекулярных облаков с преимущественным аккреционным течением вдоль магнитного поля. Результаты имеют принципиально важное значение для новой парадигмы звездообразования и особенной критической роли магнитного поля в нем.

5. ИПФ РАН, Л Пирогов, П Землянуха, И Зинченко

Исследование особенностей звездообразования в структурах обзора ATLASGAL

(APEX Telescope Large Area) и других. 1) Тонкая филаментарная структура инфракрасного пузыря N14: обнаружены комки изотопологов CO вокруг расширяющихся зон HII с несколькими молодыми звездными объектами класса I. PV-карты в линиях изотопологов CO проявляют осцилляторную структуру, что вместе с

наличием различных групп и подгрупп клампов указывает на особенности процесса фрагментации молекулярного газа. Такого же типа структурность проявляет и молекулярный комплекс Monoceros R1 в профилях скорости ^{13}CO . Все это может свидетельствовать в пользу картины глобального коллапса, как доминирующего механизма звездообразования.

2) Исследования кинематики области образования массивных звезд S255IR с разрешением около 0.1 угловых секунд (~ 200 а.е.) наличие очень тонких (около 1000 а.е.) и плотных филаментарных структур. Часть из них представляет собой стенки вокруг высокоскоростных молекулярных истечений с широким углом раствора из ядра S255IR-SMA1. Истечение искривлено и состоит из совокупности пятен, демонстрирующих периодические эпизоды инъекции из двойной системы, содержащей маломассивные протозвезды и протозвезды промежуточной массы. Один из молодых звездных объектов в этой области – S255IR NIRS3, проявляет взрывную активность. Наблюдения этого объекта в линиях CH_3CN и последующее моделирование позволили сделать уверенный вывод о выпадении плотных (порядка нескольких млрд. частиц в кубическом сантиметре) конденсаций на аккреционный диск вокруг S255IR NIRS3 из внешних областей ядра со скоростью в несколько десятитысячных масс Солнца в год. Это первые наблюдательные указания на механизмы, обеспечивающие подпитку аккреции на массивные протозвезды – проблема, долгое время не имеющая решения.

6. ЮФУ, АКЦ ФИАН, Е.О. Васильев, С.А. Дроздов, Ю.А. Щекинов

Численное комплексное исследование “микроскопии” взаимодействия вспышек сверхновых с межзвездным газом.

Крупные структуры в межзвездной среде и окрестностях галактик со звездообразованием образованы в основном множественными вспышками сверхновым. Рост этих структур на начальных этапах определяется взаимодействием отдельных вспышек между собой и турбулентными структурами межзвездной среды. Работы группы связаны с численным моделированием газовых структур с размерами от нескольких парсек до десятков килопарсек, образованных действием нескольких тысяч вспышек сверхновых, охватывая таким образом более трех порядков величин динамической шкалы масштабов. Примерами таких структур являются рентгеновские

сверхпузыри в центре нашей Галактики, сверхветер галактики M82 и мощные истечения в галактиках на больших красных смещениях. В численных моделях учитываются радиационные процессы, обогащение и перемешивание тяжелых элементов с высоким временным (несколько тысяч лет) и пространственным (несколько парсек) разрешением, позволяющим отслеживать динамику отдельных сверхновых. На основе данных моделирования производится построение синтетических наблюдений в различных спектральных линиях и континууме с учетом возможностей и особенностей существующих телескопов и планируемых инструментов. В настоящее время численные эксперименты подобного уровня выполняются лишь отдельными группами в мире. Их результаты принципиально важны для адекватной интерпретации наблюдений структур атомарного и ионизованного газа в межзвездной среде галактик, переноса массы и энергии в окологалактическую и межгалактическую среду как в локальной Вселенной, так и на больших красных смещениях.

6. ГАИШ МГУ, САО, Т.А. Лозинская, А.В. Моисеев, О. Егоров,

Исследование динамики газа и звездных фидбеков в карликовых галактиках. 1)

Фабри-Перо интерферометрия позволяет разделить фрагменты аккрецирующего газа, захваченного из окологалактической среды и ударные волны от взрывной активности звезд в галактике DDO 53. Ударные волны от вспышек СН проявляются по повышенной дисперсии скоростей в линии 21 см. Аналогичное исследование проведено и для галактики Ark 18 из обзора галактик войдов (Void Galaxy Survey).

Результат имеет принципиально важное значение для задач эволюции газа в галактиках, поскольку позволяет отделять аккрецируемый галактикой газ от галактических истечений и, тем самым, определять баланс массы межзвездного газа на различных эволюционных стадиях.

2) Фабри-Перо интерферометрия объекта Хербига-Аро HH83 показала наличие симметричной биполярной структуры с необычно высокой (250 км/с) разницей скоростей истечения с примерно равными собственными скоростями деталей, последнее указывает на их генетическую связь.

Все обнаруженные особенности кинематики HH83 указывают на то, что это погруженное в молекулярное облако симметричное биполярное истечение. Такой количественно обоснованный вывод делается для объектов HH впервые, и показывает

перспективность предлагаемого метода для построения общей теории таких объектов.

Следует особенно отметить имеющий неоценимое значение проект нового подстраиваемого интерферометра Мангал (Mapper of Narrow Galaxy Lines), который позволит строить изображения галактических и внегалактических тманностей в линиях атомов и ионов различных элементов и исследовать таким образом пространственную морфологию ионизационного состояния газа.

7. АКЦ ФИАН, КраО, А Вольвач, Л Вольвач

Состав: ВЮ Авдеев, АВ Алакоз, ОС Баяндина, ИЕ Вальтц, МГ Ларионов, НН Шахворостова, МА Щуров (АКЦ ФИАН), ГМ Рудницкий (ГАИШ)

Комплексное исследование областей звездообразования и мазерных источников.

Среди них: 1) Обнаружение 14 новых метанольных мазерных линий, связанных с горячим ядром в области массовного ЗО G358.93-0.03. Заметна вспышечная активность на шкале времени в один месяц и пространственном масштабе ~ 1000 ае. Это может свидетельствовать о преимущественно радиационном переносе соответствующего возмущения. **2)** Наблюдения вспышечной активности метанольного мазера в окрестности массивной молодой звезды G358.93-0.03 на обсерватории SOFIA подтвердили гигантскую вспышку, наблюдаемую ранее на Гершеле и продемонстрировали возможность временной “развертки” периодов роста аналогичных вспышек с помощью мониторинга. **3)** Обнаружен самый мощный в Галактике мазер метанола СНЗ ОН в направлении на массивную область активного звездообразования G358.931-0.030. Сложные вспышки на частоте 20.971 ГГц с плотностью потока до 2600 Ян являются самыми мощными за всю историю наблюдений. Наблюдается необычное поведение вспышек на близких частотах с полным исчезновением одной из вспышек на соседней частоте 19.967 ГГц. Такой феномен наблюдается впервые и требует отдельного объяснения. **4)** Обнаружение сверхмалых пространственных структур водяных мазеров (~ 250 микросекунд дуги) в источнике W49N в рамках мазерной программы телескопа РадиоАстрон. Их происхождение связывается с рассеянием мазерного излучения на неоднородностях окружающей МЗС с колмогоровским спектром.

Резюме: Исследования вспышечной активности метанольных мазеров имеет важное значение для понимания динамических процессов в областях образования массивных звезд – раздела физики МЗС, десятилетиями привлекающего внимание исследователей. Группа АКЦ ФИАН и КрАО, наравне с группой ИПФ РАН входят в число лидеров мирового уровня. Можно думать, что усилия группы АКЦ ФИАН/КрАО совместно с их коллегами у нас в стране и в мире в ближайшее десятилетие принесут критически важные результаты для решения этой проблемы.

АКЦ ФИАН, С Каленский,

Новые методы поиска и наблюдений сложных органических молекул в межзвездной среде. Среди результатов наиболее значимы следующие: 1) Развита новая технология поиска и наблюдений сложных органических молекул в рамках программы детального исследования молекулярного состава облака ТМС-1 – одного из ближайших к нам молекулярных облаков (140 пк), на обсерватории Грин Бэнк (GOTHAM – GBT Observations of TMC-1: Hunting Aromatic Molecules). Целью программы является исследование сложных молекулярных спектров, которые попадают в область между радио- (для сравнительно легких молекул) и ИК-оптикой для тяжелых молекул типа (ПАУ) полициклических ароматических углеводородов). Сюда относятся, например, цианополиины (HC_9N , HC_{11}N ,...), бензонтрил ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CN}$), цианофталин ($\text{C}_{10}\text{H}_7\text{CN}$), и ряд других соединений, играющих ключевую роль в межзвездной химии сложных органических молекул. Новый подход основан на технике Монте-Карло марковский цепей, дополненной стековым накоплением и фильтрацию линейчатых спектров по скоростям, позволяет существенно улучшать отношение сигнал/шум и уверенно выделять спектральные линии в высоко-зашумленных спектрах. 2) Использование этой технологии позволило впервые в мире обнаружить ряд молекул с трудно идентифицируемыми спектрами: HC_4NC в облаке ТМС-1с уровнем значимости детектирования составляет $\sim 10\sigma$. Обнаружение этой молекулы имеет важное значение для понимания органической химии молекулярных облаков, поскольку она тесно вплетена в цепочку цианидов межзвездной биохимии. Обнаружена высокополярная молекула цианопентадина $\text{C}_5\text{H}_5\text{CN}$.

ИНАСАН. Состав: Кирсанова М.С., Вибе Д.З., Павлюченков Я.Н., Акимкин В. В., Мурга М.

С., Кочина О. В., Молярова Т., Рябухина О.Л., Буслаева А.И., Сивкова Е., Плакитина К.

Астрохимия областей звездообразования: от простых молекул к сложной органике, от

галактических масштабов к протопланетным дискам. На ведущих российских и международных обсерваториях научная группа провела наблюдения областей звездообразования в широком диапазоне спектра – от оптики до миллиметров.

Научной группой получены прорывные результаты в физике межзвездной среды, а именно исследована сложная 3D структура областей звездообразования. Определены температура и плотность межзвездного газа вблизи молодых звезд по наблюдениям в оптике и ИК, исследована кинематика газа в расширяющихся газо-пылевых оболочках, заполняющих пространство между звездами. По наблюдениям в суб-мм и миллиметровом диапазонах определен молекулярный состав межзвездной среды: обилие простейших молекул и сложной органики. Научной группой показано, что химический состав облаков определяется историей их формирования. Обнаружены многоатомные молекулы в т.ч. в экстремальных условиях вблизи молодых протозвезд с мощным ультрафиолетовым и рентгеновским излучением. Научной группой разрабатываются численные астрохимические модели молекулярных облаков и протопланетных дисков. Показано, что линейчатые спектры межзвездных молекул являются чрезвычайно чувствительным инструментом диагностики межзвездной среды, областей образования звезд и планет.

Резюме: 1) исследование разнообразия молекулярного состава в областях звездообразования (ЗО) и образования планет, 2) условия формирования и выживания многоатомных, в т.ч. предбиологических молекул в межзвездной среде 3) связь астрохимического статуса ближайших областей ЗО со свойствами протопланетных дисков, наблюдаемых экзопланет и протосолнечной туманности 4) создание собственных инструментов для исследований в мм и субмм диапазонах длин волн. Эти направления представляются наиболее перспективными в следующем десятилетии для адекватного понимания физики ЗО протопланетных систем.

Все указанные здесь исследования выполняются в тесном сотрудничестве с ведущими международными коллаборациями и поэтому несомненно представляют собой наиболее перспективные направления в физике МЗС на ближайшее десятилетие.

Всего за этот период опубликовано более 150 статей: АЖ, АБ, ПАЖ, АЈ, АрЈ, А&А, MNRAS, NatAstr, Science, NewA, PASJ и др.

Абревиатуры:

ИМСС УрО РАН – Институт Механики Сплошных Сред УрО РАН,

ПНИПИ – Пермский Научно исследовательский Политехнический Институт

5 Внегалактическая астрономия.

Р.Д. Дагкесаманский

В целом, как наглядно показала, в частности, работа секции ВАК-2021 «Физика галактик и космология», отечественная внегалактическая астрономия находится на подъеме. На секции было представлено большое число наукоемких интересных докладов от молодежи, включая аспирантов и даже студентов. В стране работают большие кластеры российских астрономов, развивающиеся на основе отечественных школ физики и динамики галактик, они поспевают за самыми передовыми тенденциями мировой науки, и их результаты очевидным образом востребованы мировым астрономическим сообществом. Среди наблюдательных работ в российской внегалактической астрономии особенно популярно исследование активных ядер галактик: на мировом уровне хорошо смотрятся и отлично цитируются российские мониторинговые статьи, а также уникальные данные космических телескопов РадиоАстрон и Спектр-РГ. В чем мы, несомненно, отстаем – это в области оптических обзоров больших площадок неба, что является сейчас магистральным направлением мировой внегалактической астрономии. Ликвидировать это отставание могла бы помочь реализация проекта, который уже давно обсуждается как одно из перспективных направлений развития российской астрономии: речь идет о большом,

диаметром не менее 4х метров, специализированном обзорном телескопе, установленном в месте с умеренно хорошим астроклиматом. Глубокие фотометрические и широкопольные (многообъектные) спектральные обзоры на собственном инструменте вывели бы нашу внегалактическую астрономию на передовые позиции в мире: только у нас возможно массовое исследование объектов вблизи северного полюса неба, куда не достают телескопы, установленные в Чили, на Гавайях и на Канарах.

6 Космология и микрофизика.

В.Н. Лукаш

Локомотивом нашей секции являются данные, полученные при анализе наблюдений. Они позволяют строить новые модели физических процессов и объектов во Вселенной и достраивать стандартную космологическую модель. В свою очередь, новые физические модели и теории предсказывают, в широком диапазоне масштабов и энергий, новые эффекты и явления, которые должны верифицироваться новыми наблюдательными тестами, что, в свою очередь, приводит к появлению новых наблюдательных данных.



Ключевые задачи современной космологии:

- * Ранняя Вселенная (спектр, анизотропия и поляризация реликтового излучения);
- * Астрофизика (фоны, обзоры, источники);
- * Черные дыры, черно-белые дыры, мультивселенная;
- * Физическое состояние газа и звездообразование при $z \sim 10$.

Текущие и ближайшие проекты:

- * Близкий ИК фон (JWST);

- * Далекий ИК фон (Космическая обсерватория Миллиметрон);
- * Рентгеновский, УФ и оптический диапазоны (Спектр-Рентген-Гамма, Спектр-УФ, Euclid);
- * Радио (SKA, LOFAR).

Физика частиц и полей:

- * Нейтрино (иерархия масс, обзоры галактик и скоплений);
- * Природа темной материи (рентгеновское излучение из центра Галактики, аннигиляция темной материи в каспах);
- * Аккреция на черные дыры (SED, массы и моменты вращения черных дыр);
- * **БАО в спектре мощности космологических возмущений плотности.**

7 Жизнь и разум во Вселенной

А.Д.Панов.

Большинство текущих исследований по программе SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence – поиск внеземного разума) нацелены на однократное наблюдение одиночных звезд - кандидатов SETI с целью обнаружения узкополосных радиосигналов, имеющих признаки искусственного происхождения. Для этого используются обычные радиотелескопы, обладающие высокой чувствительностью, но малым полем зрения. Такие исследования неявно предполагают, что внеземная цивилизация ведет *непрерывную* передачу сразу по очень многим направлениям, так что уже однократное наблюдение инопланетного передатчика должно привести к положительному результату. Оценки энергетики таких передач показывают, что их способны поставить только цивилизации, приближающиеся ко второму типу по Кардашеву (с энергетикой порядка энергетики родительской звезды). Однако такие цивилизации могут отсутствовать в Галактике или вообще во Вселенной. Следовательно поиск SETI должен быть направлен также на поиск более скромных цивилизаций первого типа (с энергетикой не превышающей или не сильно превышающей планетарную), про которые точно известно, что они в принципе могут существовать (на нашем собственном примере). Для цивилизаций первого типа следует ожидать, что они в лучшем случае в своих передачах будут сканировать небо

или звезды-кандидаты узконаправленным лучом (для лучшей концентрации энергии и повышения отношения сигнал/шум), так что мы можем получить от такой внеземной цивилизации лишь краткую порцию сигнала в неизвестное время с непредсказуемого направления.

Практикуемые в настоящее время методики однократного наблюдения звезд-кандидатов не адаптированы к поиску цивилизаций первого типа, так как отрицательный результат однократного наблюдения кандидата не оставляет никакой информации в отношении присутствия около исследуемой звезды передатчика, по той причине, что невозможно ожидать, что передача в нашем направлении будет вестись непрерывно. Для целенаправленного поиска цивилизаций первого типа нужны не однократные наблюдения одиночных звезд, но постоянный мониторинг всего неба, тогда редкое событие, связанное с приходом межзвездной передачи, не будет пропущено. Важно отметить, что в настоящее время широкоугольные наблюдения неба в режиме постоянного мониторинга сигналов SETI нигде в мире не ведутся.

Круглосуточный мониторинг всего неба является идеалом, которого в наблюдениях SETI не удастся достигнуть быстро, но на пути к этому идеалу должны создаваться методики, реализующие наблюдение одновременно как можно более широких участков неба в режиме, наиболее близком к непрерывному. Для черенковского массива TAIGA-HiSCORE [1] разработана принципиально новая методика наблюдения астрономических оптических транзиентов наносекундного диапазона и сделаны первые шаги в реализации длительных и чрезвычайно широкоугольных наблюдений SETI, не имеющие в мире никаких аналогов. Получены и опубликованы первые результаты этой работы [2].

Ведущими организациями коллаборации TAIGA являются НИИЯФ МГУ и ИГУ; в нее входят еще около десятка российских и зарубежных институтов и университетов. Широкоугольный черенковский массив TAIGA-HiSCORE (High Sensitivity COsmic Rays and gamma Explorer) предназначен, главным образом, для исследований в области гамма-астрономии сверхвысоких энергий и физики космических лучей методом широких атмосферных ливней (ШАЛ), однако было показано, что с его помощью может проводиться также поиск наносекундных оптических транзиентов астрофизического происхождения. Телескоп HiSCORE состоит из множества (порядка сотни) отдельных оптических станций, в каждую из которых входят ФЭУ с общей

площадью входного зрачка около 0.5 м^2 , которые расставлены на площади около одного квадратного километра. Порог чувствительности каждой станции составляет приблизительно 3000 фотонов зеленого диапазона на 1 м^2 за 10 нс времени интегрирования электроники. Существенной особенностью телескопа HiSCORE является очень широкое по сравнению с обычными астрономическими инструментами поле зрения, примерно соответствующее конусу с раствором 60° (около 1 стер). Направление на источник определяется с точностью около 0.03° по временам срабатывания оптических станций, то есть в этих астрономических оптических наблюдениях не используется никакая фокусирующая оптика. Система такого типа была реализована впервые в мире. За один сезон (осень-весна) инструмент набирает чистую экспозицию около 450 часов.

Было показано, что источником искомых оптических импульсов может быть космический лазер наносекундного диапазона. Согласно оценкам, для генерации импульсов, превышающих порог HiSCORE с межзвездных расстояний, достаточно лазерных установок вполне скромных масштабов. Например, при апертуре лазерной фазированной решетки в 1000 метров и расстояния до нее в 1000 св. лет достаточно иметь импульс с начальной энергией всего около 100 кДж за 10 нс. Такие устройства вполне могут быть доступны цивилизациям первого типа (собственно, параметры такой установки недалеко от тех, которые могут быть построены на Земле уже сейчас). Следовательно телескоп HiSCORE хорошо адаптирован для поиска цивилизаций первого типа в оптическом диапазоне.

В настоящее время для поиска оптических транзиентов уже обработаны данные HiSCORE сезона 2018-2019 гг. Эти данные соответствуют ранней конфигурации массива HiSCORE, когда в его состав входило всего около 50 оптических станций, поэтому фон ШАЛ для событий оптических транзиентов (искались события-репитеры) был довольно велик. Хотя один кандидат в оптические транзиенты был обнаружен, но из-за высокого фона его статистическая значимость оказалась невысокой. По результатам проведенных наблюдений получено первое ограничение сверху на темп событий наносекундных транзиентов: для событий с плотностью потока оптических квантов более 10^{-4} эрг/сек/см² и длительностью более 5 нс не более 2×10^{-3} событий/стер/сутки.

На очереди обработка данных сезонов 2019-2020 гг и 2020-2021 гг; работа будет проводиться постоянно и далее по мере получения новых данных. Нужно отметить, что строительство массива HiSCORE не закончено, количество станций и площадь, занятая ими, растет от сезона к сезону. В настоящее время в состав массива входит уже более 100 оптических станций, и это означает резкое улучшение фоновых условий для регистрации оптических транзиентов. Важно, что вся работа проводится в сопутствующем режиме, не требуя дополнительного оборудования и финансирования и не мешая проведению основных научных программ коллаборации TAIGA, связанных с космическими лучами и гамма-астрономией. Собственно, вся работа сводится к использованию специальных алгоритмов обработки данных, которые фильтруют кандидаты в транзиенты из потока событий ШАЛ. В будущем предполагается к программе SETI поиска оптических транзиентов HiSCORE подключить также имиджевые черенковские телескопы TAIGA-IACT, что тоже можно сделать в сопутствующем режиме.

Можно отметить, что единственным конкурентом HiSCORE в обозримом будущем будет проект Panoramic SETI, основанный на использовании мозаики широкоугольных оптических телескопов с френелевской оптикой. Параметры этой установки будут близки к параметрам HiSCORE, но Panoramic SETI находится еще в стадии проектирования, и к моменту запуска этого проекта массив HiSCORE будет иметь уже несколько лет обработанных данных.

[1] M. Tluczykont and D. Hampf and D. Horns et. al. Adv. Space Res., 2011, V. 48, 1935.

[2] Panov A.D., Astapov I.I., Awad A.K. et. al. Proceedings of Science, 2021, V. ICRC2021, 951.

[3] S. A. Wright, P. Horowitz, J. Maire, et al. Proceedings of the SPIE, 2018, V. 10702, id. 107025I.

8 Релятивистская астрофизика и гравитационные волны.

А.В. Иванчик

Исследование астрофизических объектов с экстремальным выделением энергии - коллапсирующих звезд и аккрецирующих черных дыр (как звездных масс, так и сверхмассивных) требует создания новых высокочувствительных гамма телескопов.

Современные наземные атмосферные черенковские телескопы обладают наиболее высокой чувствительностью, на порядки превышающей возможности орбитальных детекторов.

В ФТИ им. А.Ф. Иоффе разработан проект уникальной международной черенковской гамма-обсерватории ALEGRO (Atmospheric Low Energy Gamma Ray Observatory - Атмосферная Низкоэнергичная Гамма Обсерватория). Обсерватория ALEGRO будет коллективно использоваться широким астрофизическим сообществом для наземных наблюдений астрофизических объектов с экстремальным энерговыделением в гамма-диапазоне энергий от 5 Гигаэлектронвольт (ГэВ) до 10 Тераэлектронвольт (ТэВ). Предлагаемая высокогорная обсерватория ALEGRO будет иметь беспрецедентно низкий порог детектирования гамма-квантов – около 5 ГэВ и, тем самым, достигнет теоретического предела черенковской гамма астрономии. Рекордно высокая чувствительность в диапазоне ГэВ позволит открыть новые типы транзиентных источников, ненаблюдаемых орбитальными телескопами.

Для наблюдений в диапазоне энергий фотонов 5-100 ГэВ в предлагается построить 4 телескопа с эффективным диаметром зеркал около 30 м.. В телескопах предполагается использовать современные оригинальные микроэлектронные и схемотехнические решения. Прототипы телескопов, разработанные в ФТИ им. А.Ф. Иоффе могут использовать как современные вакуумные фотоумножители, так и кремниевые фотонные счетчики, представляющих собой матрицы лавинных фотодиодов. Эти полупроводниковые приборы обладают уникальной чувствительностью, позволяющей зарегистрировать единичный оптический фотон, и наносекундным временным разрешением. Сигналы, приходящие с фотонных счетчиков, будут обрабатываться мультисканальной системой считывания, преобразования и хранения сигнала с наносекундным временным разрешением. Обсерватория ALEGRO разрабатывается совместно с коллегами из МГУ, ИЯИ РАН и международными партнерами из Аргентины, Армении, Германии и др., и после введения в эксплуатацию будет представлять собой центр коллективного пользования, доступный для широкой научной общественности.

Астрономы получают возможность подавать заявки на наблюдения, которые будут рассматриваться международной комиссией экспертов на основании четко сформулированных и прозрачных критериев. Такая система функционирования

обсерватории позволит наиболее эффективно использовать доступное наблюдательное время.

9 Астрометрия и прикладная астрономия.

И.С. Гаязов

Основными задачами астрометрии являются создание устойчивых координатных систем на небе (небесная система координат), на Земле (земная система координат) и определение их взаимной ориентации посредством параметров вращения Земли. Базовую основу наземных измерительных средств для решения этих задач составляют глобально распределенные сети станций, проводящих регулярные наблюдения внегалактических радиоисточников методом радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ) и наблюдения специализированных спутников методами радио и лазерной дальнометрии.

1. Небесная систем координат.

Текущая версия небесной системы координат (НСК) – ICRF3, принятая в 2018 г. Международным астрономическим союзом (МАС), была реализована в виде каталога координат внегалактических радиоисточников, наблюдаемых лишь с помощью метода РСДБ. ICRF3 содержит положения 4536 внегалактических радиоисточников и впервые была реализована в трех диапазонах радиоволн: X/S, Ka/X и K. В целом точность реализации НСК в настоящее время находится на уровне 30-50 микросекунд дуги.

Российский вклад в ICRF3 определяется наблюдениями квазаров на радиотелескопах РСДБ-комплекса «Квазар-КВО», результатами обработки всех доступных РСДБ-наблюдений в ИПА РАН с получением каталога радиоисточников и представлением его в центр комбинирования Международной РСДБ-службы (IVS – International VLBI Service for Geodesy and Astrometry).

В соответствии с новой резолюцией МАС реализация высокоточной НСК с 1 января 2022 г. будет включать каталог ICRF3 (в радиодиапазоне) и каталог Gaia-CRF3 (в оптическом диапазоне), полученный в ходе реализации проекта космической астрометрии Gaia. Второй релиз данных Gaia (DR2) также содержит положения

огромного числа квазаров (более 500 000 тыс.). В связи с этим одним из важнейших направлений исследований является внешняя верификация данных, которая должна осуществляться на основе сравнения положений квазаров в каталоге Gaia с положениями, определяемыми из РСДБ-наблюдений.

Дальнейшее усовершенствование НСК будет идти по направлению построения каталогов с использованием наблюдений радиоисточников в более высоких частотных диапазонах, менее подверженных влиянию различных помех. Еще одним направлением развития НСК является увеличение плотности покрытия небесной сферы квазарами, особенно в южном полушарии, и оптимизация состава источников в целом.

В то же время, следует отметить, что высокоточные каталоги, построенные с помощью специальных космических аппаратов, имеют определенные ограничения при использовании для практических приложений на Земле. Наблюдения с поверхности Земли подвержены искажениям, вызываемым атмосферой, и достигнутая в космосе точность положений звёзд и радиоисточников трудно реализовать в полной мере при наземных наблюдениях, проводимых, например, для определения параметров вращения Земли. Поэтому одной из актуальных задач является исследование моделей среды распространения сигналов.

2. Земная система координат.

Международная земная система координат в настоящее время реализуется в виде каталога (последняя версия – ITRF2014), содержащего координаты и скорости более 1500 пунктов на земной поверхности. Из этих пунктов около 40 расположены на территории РФ. Отечественная геоцентрическая система координат ПЗ-90.11 (версия 2011 года, реализованная Министерством обороны Российской Федерации) согласована с системой ITRF на уровне 1 см. Она используется в системе ГЛОНАСС и служит основой при решении, главным образом, навигационных задач прикладного характера. С научной точки зрения очевидна необходимость поддержки системы ITRF путем расширения на территории РФ сети пунктов колокации, на которых размещены современные наблюдательные средства методами РСДБ, радио и лазерной

дальнометрии, а также высокостабильные стандарты частоты и другое вспомогательное оборудование.

3. Параметры вращения Земли.

Точность определения параметров вращения Земли (ПВЗ) в последние годы составляет несколько десятков микросекунд дуги, что обеспечивает переход из земной системы координат в небесную с ошибкой, не превышающей единицы мм на поверхности Земли. Основной прогресс в отечественной службе определения ПВЗ в последние годы связан с высокоточным (и многократным в течение суток) определением всемирного времени. Благодаря введению в строй малоразмерных и быстроповоротных антенн радиотелескопов нового поколения на обсерваториях комплекса «Квазар-КВО» всемирное время определяется 4-6 раз в сутки с погрешностью около 20 мкс. Эти данные востребованы отечественной спутниковой навигационной системой ГЛОНАСС. Дальнейший прогресс связан с предполагаемым введением в строй новой антенны РТ-13 в Уссурийской астрофизической обсерватории, вошедшей в состав ИПА РАН в 2019 г. Это позволит увеличить максимальную базу комплекса «Квазар-КВО» в 1.5 раза и пропорционально повысить точность определения всемирного времени до 10-15 микросекунд. Результаты многократного в течение суток определения всемирного времени с такой точностью представляют большую ценность для изучения внутрисуточных вариаций вращения Земли и взаимосвязи этих вариаций с различными геофизическими явлениями, в первую очередь, с глобальной динамикой Мирового океана и атмосферы.

В перспективе до 2035 года РСДБ, по-видимому, останется единственным средством, позволяющим комплексно решать основные фундаментальные задачи координатно-временного обеспечения:

- построение и поддержание небесной системы координат (ICRF/ICRS) и ее реализация в виде каталогов координат внегалактических источников (РСДБ является единственной технологией);

- построение и поддержание земных систем координат (ITRF/ITRS) и их реализация в виде каталогов координат и скоростей опорных станций (играет важнейшую роль, прежде всего, для установления масштаба);
- определение параметров вращения Земли (играет важнейшую роль, так как РСДБ является единственной технологией для определения всемирного времени и углов нутации);
- определение параметров тропосферы и ионосферы (РСДБ позволяет получать информацию наряду с другими технологиями).

Основными направлениями развития наземной РСДБ являются:

- расширение частотных диапазонов, выбор стратегии проведения РСДБ-наблюдений, в том числе в рамках международных сетей;
- усовершенствование алгоритмов планирования РСДБ-сессий;
- увеличение стабильности стандартов частоты, мониторинг и учет физических параметров, влияющих на водородные стандарты частоты, и на этой основе реализация непрерывной шкалы времени на обсерваториях;
- изучение пространственной, временной и частотной структуры радиоисточников;
- изучение связи положений объектов в радио и оптических диапазонах;
- минимизация и учет инструментальных факторов для достижения субмиллиметровой точности РСДБ задержек;
- совершенствование моделей атмосферной и океанической нагрузок;
- построение глобальных карт деформации Земной поверхности в режиме реального времени.

Важное значение имеет расширение отечественной сети РСДБ-станций «Квазар-КВО» не только на территории Российской Федерации, но также и путем строительства новых пунктов за рубежом. Наиболее предпочтительными местами расположения новых станций являются Республика Куба и Антарктида.

Имеющиеся в настоящее время технологии РСДБ могут существенно повысить астрометрическую точность при увеличении длины базы радиоинтерферометра за пределами поверхности Земли. Размещение РСДБ-антенны на Луне, например, позволит существенно повысить точность реализации НСК, а также совершить

качественный скачок в изучении орбитально-вращательного движения Луны. Необходимо начинать серию исследований в этом направлении. В целом для построения и поддержания высокоточных отечественных фундаментальных эфемерид Луны и планет необходимо также развивать соответствующие наблюдательные средства, куда относятся лунный лазерный локатор и планетный радиолокатор, функционально совмещенный с радиотелескопами РСДБ-комплекса «Квазар-КВО».

В настоящее время развитие астрометрии неразрывно связано с задачами прикладного координатно-временного и навигационного обеспечения, в частности с задачей фундаментальной поддержки отечественной навигационной системы ГЛОНАСС. Для успешного решения этой задачи с учетом перспективных требований необходимы дальнейшее совершенствование имеющихся средств мониторинга ПВЗ и введение в строй новых пунктов колокации.

В заключение также следует отметить актуальность наземных астрометрических наблюдений астероидов и спутников планет. Такие наблюдения не потеряли свою актуальность и необходимо поддерживать проведение их на различных обсерваториях и развитие методов редукций с использованием новых каталогов.

10 Оптические телескопы и методы.

11 Радиотелескопы и методы.

А.В. Ипатов, В.В. Орешко

Радиотелескопы в Российской Федерации в 2021 году:

1. Радиотелескоп РТ-22 ФИАН, ввод в эксплуатацию 1959 г., действующий.

Первый в мире крупный полноповоротный радиотелескоп сантиметрового и миллиметрового диапазона радиоволн с параболическим рефлектором диаметром 22 м. Основное направление исследований на РТ-22 - исследование областей звездообразования и звезд поздних классов по наблюдениям атомарных и

молекулярных спектральных радиолний. Ряды наблюдений для мазеров в линии водяного пара являются максимальными в мировой радиоастрономии. В настоящее время проводятся регулярные спектральные наблюдения более 150 мазерных источников H₂O. За последние 15 лет опубликовано более сотни работ по данным наблюдений на радиотелескопе РТ-22.

Потенциал радиотелескопа используется не полностью, необходимо проведение юстировки для устранения деформаций поверхности рефлектора и модернизация приемного комплекса радиотелескопа. В результате возможно повышение 3 – 4 раза чувствительности в миллиметровом диапазоне радиоволн.

2. Радиотелескоп РТ-22 КРАО, ввод в эксплуатацию 1966 г., действующий.

Радиотелескоп РТ-22 КРАО - улучшенный аналог РТ-22 ФИАН, создан с учетом опыта его эксплуатации, с некоторыми изменениями в конструкции: увеличенный размер контррефлектора, измененное положение облучателей. Направления исследований на

РТ-22 КРАО - мониторинг активных ядер галактик, наблюдения молекулярных линий в радиодиапазоне, исследования солнечной и звездной активностей, РСДБ-наблюдения в рамках астрофизических, геофизических и радиолокационных проектов.

Радиотелескопы РТ-22 способны работать в миллиметровом диапазоне радиоволн, но они не сопоставимы с лучшими радиотелескопами мира в этом диапазоне частот: 100-метровый радиотелескоп GBT, 64-метровый Sardinia Radio Telescope (SRT).

3. Радиотелескоп РАТАН-600 САО, ввод в эксплуатацию 1974 г., модернизация 2020 г., действующий.

РАТАН-600 - многоэлементная антенна переменного профиля (АПП), диаметр 600 м, размер отдельного элемента 11,4 x 2 м, число элементов 895. Назначение – исследование астрономических объектов, начиная от самых близких (Солнце и солнечная система: планеты, спутники, солнечный ветер) и кончая самыми удаленными, как в пространстве – радиогалактики и квазары, так и во времени – космическое микроволновое фоновое излучение. На радиотелескопе идут программы

ежедневного мониторинга Солнца, многочастотного мониторинга блазаров и квазаров. Число организаций пользователей радиотелескопа выросло с 2014 по 2020 годы с 14 до 25, ежегодно на основе наблюдений на РАТАН-600 публикуются десятки научных работ.

Радиотелескоп РАТАН-600 является крупнейшим в мире по диаметру рефлектора и основным в России радиотелескопом дециметрового и сантиметрового диапазонов радиоволн. По некоторым параметрам РАТАН-600 превосходит или сопоставим с лучшими радиотелескопами мира.

4. Радиотелескоп БСА ФИАН, ввод в эксплуатацию 1974 г., модернизация 2020 г., действующий.

Радиотелескоп БСА представляет собой фазированную антенную решетку, состоящую из 16384 волновых диполей расположенных на площадке 200x400 м. Работает в диапазоне 109 – 113 МГц. Основные направления исследований: исследования пульсаров, исследования межзвездной плазмы по наблюдениям пульсаров, исследования солнечного ветра на основе мониторинга мерцающих источников, поиск пульсаров и источников транзиентного радиоизлучения. Ежегодно по результатам наблюдений на радиотелескопе БСА публикуется 20 - 30 научных работ.

Радиотелескоп БСА является единственным действующим радиотелескопом метрового диапазона радиоволн в России. По некоторым своим параметрам радиотелескоп превосходит или сопоставим с лучшими радиотелескопами мира.

5. Радиотелескопы комплекса «КВАЗАР-КВО» ИПА, действующие: РТ-32 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары», ввод в эксплуатацию 1997 – 2005 г., РТ-13 в обсерваториях «Светлое», «Зеленчукская» и «Бадары» ввод в эксплуатацию 2013 - 2019 г..

Радиоинтерферометрический комплекс «Квазар-КВО» - это специализированный комплекс радиотелескопов, работающий в режиме радиоинтерферометра со сверхдлинной базой (РСДБ). В состав комплекса входят три радиотелескопа дециметрового – сантиметрового диапазонов РТ-32 и три радиотелескопа

сантиметрового – миллиметрового диапазона РТ-13. Радиотелескопы полноповоротные с диаметрами рефлектора 32 и 13 метров соответственно. Основными задачами комплекса являются: построение и поддержание небесной опорной системы координат в виде каталогов координат внегалактических радиоисточников; построение и поддержание земной опорной системы координат в виде каталогов координат и скоростей опорных станций; оперативное определение параметров вращения Земли с высоким временным разрешением. Дополнительные задачи: РСДБ наблюдения по астрофизическим программам, наблюдения по астрофизическим программам в режиме одиночного телескопа, радиолокационные наблюдения астероидов, наблюдения космических аппаратов.

В части своего основного назначения РСДБ комплекс «КВАЗАР-КВО» соответствует лучшим мировым РСДБ комплексам, использующим современные достижения в технологиях аналоговой и цифровой техники.

Полноповоротные радиотелескопы РТ-32 доступны для радиоастрономических исследований по астрофизическим программам и являются крупнейшими в России в дециметровом и сантиметровом диапазонах радиоволн. Но для многих задач радиоастрономических исследований диаметр рефлектора антенны недостаточен, несопоставим с лучшими мировыми радиотелескопами с размером рефлектора 100 или 64 метра.

6. Радиотелескоп СРГ (ССРТ) ИСЗФ, ввод в эксплуатацию 2021 г.

Сибирский радиогелиограф СРГ - многочастотный солнечный радиотелескоп, рассчитанный на работу в диапазоне частот 3-24 ГГц. Радиогелиограф состоит из трёх независимых Т-образных антенных решёток, работающих в диапазонах частот: 3-6, 6-12, 12-24 ГГц. Основные задачи исследования Солнца: физика солнечных вспышек и выбросов корональной массы, сверхслабая активность, солнечные магнитные поля.

Радиотелескоп СРГ является уникальным, лучшим в мире специализированным радиотелескопом для исследования Солнца.

Перспективы развития радиотелескопов в России на ближайшие годы.

1. Проект «Миллиметрон»

10-метровый космический телескоп, предназначенный для исследования различных объектов во Вселенной в миллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн от 0,07 до 10 мм. Планируемая дата запуска – 2029 г.

Научная программа космической обсерватории Миллиметрон направлена на решение ряда наиболее важных и прорывных научных задач в области современной астрофизики и космологии, а именно детальное изучение тени чёрных дыр, поиск кротовых нор, следы воды в Галактике, спектральные искажения реликтового излучения.

2. Развитие комплекса «КВАЗАР-КВО»

Оснащение Уссурийской астрофизической обсерватории РСДБ комплексом из двух радиотелескопов РТ-13, создание пункта «КВАЗАР-КВО». Планируемая дата ввода в эксплуатацию – 2030 г.

3. В России нет радиотелескопов дециметрового-сантиметрового диапазонов с эффективной площадью более 1000 м² и обладающих возможностью сопровождения объекта наблюдения, в тоже время, для многих радиоастрономических исследований необходимы антенны с эффективной площадью более 2000 м², что соответствует диаметру рефлектора 64 м и более. Министерство обороны и «Роскосмос» имеют антенны диаметром 70 и 64 метра, но предлагается выкупать у владельцев время использования антенн и самостоятельно оснащать их приемно-регистрирующими комплексами. При этом стоимость наблюдательного времени чрезвычайно высока, так же как и стоимость дополнительного радиоастрономического оборудования. Астрономическому сообществу России, для выхода на мировой уровень радиоастрономических исследований, базирующийся на радиотелескопах с диаметром рефлектора 64 – 100 м, необходим полноповоротный радиотелескоп дециметрового - сантиметрового диапазонов принадлежащий министерству науки и высшего образования с диаметром рефлектора более 60 метров.

(А.В. Ипатов «четыре 13-м новых радиотелескопа ИПА РАН оснащены приемниками на длину волны 8 мм. Но почему-то астрофизиками эти телескопы не востребованы».)

12 Внеатмосферная астрономия.

А.А. Лутовинов

Текущее состояние дел

Современная группировка космических аппаратов, нацеленных на решение задач внеатмосферной астрономии, насчитывает более десятка спутников и телескопов/инструментов. Большая часть этих аппаратов является проектами американского космического агентства НАСА (Chandra, NuSTAR, Swift, Fermi, Hubble) и европейского космического агентства ЕКА (AGILE, INTEGRAL, XMM-Newton, Gaia); по одному проекту имеют Индия (AstroSAT) и Китай (HXMT). Благодаря успешному запуску и более чем двухлетней работе на орбите среди действующих в настоящее время астрофизических космических экспериментов также есть один проект, реализованный ГК Роскосмос по заказу Российской академии наук, – рентгеновская обсерватория Спектр-РГ. Обсерватория создана при участии Германии и включает два рентгеновских зеркальных телескопа: германский eRosita и российский ART-XC им. М.Н.Павлинского. Телескоп ART-XC является первым российским телескопом с зеркалами косоугольного падения и полупроводниковыми детекторами. Он был разработан и создан в России в кооперации Института космических исследований РАН и Всероссийского федерального ядерного центра в г.Саров (РФЯЦ-ВНИИЭФ) с участием Центра полетов им. Маршалла (НАСА).

Помимо крупных обсерваторий зарубежные страны активно используют Международную космическую станцию для проведения астрофизических исследований. В частности, можно отметить эксперименты NICER (НАСА), MAXI (Япония). Российские эксперименты астрофизического направления на борту МКС в последние десять лет практически не проводились.

Российские научные приборы установлены на некоторых зарубежных космических миссиях (например, инструмент «Конус» на КА WIND, гамма-детекторы на марсианских планетных миссиях, на аппарате «ВеруColombo»). Российские учёные также участвуют в ряде зарубежных космических миссий, в частности, они обладают правами на 25% данных обсерватории INTEGRAL в обмен на ее запуск российской ракетой-носителем Протон.

Суммируя вышесказанное, можно утверждать, что несмотря на отдельные достижения мирового уровня в области развития технологий космических экспериментов, в целом

Российская Федерация значительно уступает в этом аспекте ведущим космическим державам и агентствам.

Перспективы внеатмосферной астрономии в России и в мире

В настоящее время программа космических исследований в РФ осуществляется в рамках Федеральной космической программы 2016 } 2025 гг. (ФКП). Более того и на последующие за этим годы приоритеты также, в основном, расставлены, так как основная часть космических миссий запланированных к пуску до 2030 г. уже находится в стадии ОКР и финансируется из текущей ФКП. Приоритетность и актуальность того или иного проекта определяется Советом РАН по космосу. Ниже обсуждаются ключевые направления развития астрофизических космических экспериментов и дается краткий обзор планируемых к запуску аппаратов и обсерваторий, как в России, так и в мире.

Основной прогресс в развитии астрофизических космических экспериментов идёт по в основном по трем направлениям:

- а) увеличение апертуры и/или эффективной площади телескопов, а также площади приёмников излучения, это позволяет регистрировать более слабые объекты, получать лучшее отношение сигнала к шуму;
- б) улучшение углового разрешения инструмента – позволяет получать более детальные изображения объектов, а в совокупности с пунктом а), и с большей чувствительностью;
- в) улучшение спектрального и временного разрешения инструмента – позволяет обнаруживать и измерять узкие особенности в спектрах объектов, определять их химический состав, а также проводить анализ быстрой переменности сигнала и измерять скорости с высокой точностью.

По всем этим направлениям современные космические астрофизические эксперименты реализуют самые последние технологические достижения. Инструменты достигают размеров 3 } 10 м, с рабочей массой некоторых спутников до 4 } 5 тонн; поверхности зеркал телескопов полируются вплоть до шероховатостей в несколько ангстрем; в качестве приёмников излучения используются инструменты, работающие на различных физических принципах. Сложность создания крупных обсерваторий и широкий спектр решаемых ими задач обуславливают и их высокую стоимость (миллиарды долларов). Поэтому в мире широкое развитие получило направление создания небольших инструментов и обсерваторий (сотни килограмм), которые могут решать вполне конкретные и важные с точки зрения ученых научные задачи при умеренном финансировании. Кроме того

предпринимаются попытки использовать микро и наноспутники первую очередь для отработки тех или иных технологий.

В РФ работы по этим направлениям также ведутся, их продолжение, развитие и интенсификация являются обязательным условием сохранения роли РФ в научном космосе.

Приоритетами программы внеатмосферной астрономии рамках текущей ФКП-2025 в России является программа «Спектр» – продолжение успешного функционирования на орбите обсерватории «Спектр-РГ» (запущена в июле 2019 года) и запуск обсерватории «Спектр-УФ» (ориентировочная дата 2025 год):

Проект «Спектр-РГ» (Спектр-Рентген-Гамма) предназначен для проведения обзора всей небесной сферы в рентгеновском диапазоне энергий с высокой чувствительностью, угловым и энергетическим разрешением. На борту обсерватории установлены два уникальных рентгеновских зеркальных телескопа: ART-XC им. М.Н.Павлинского (Россия) и eROSITA (Германия), работающие по принципу рентгеновской оптики косого падения. После успешного запуска в июле 2019 года и первых месяцев калибровочных и тестовых наблюдений, в декабре 2019 года обсерватория начала проведение обзоров всего неба. Каждый обзор занимает примерно полгода и, таким образом, к настоящему моменту (октябрь 2021 года) обсерватория уже завершила три обзора и проводит четвертый. Всего запланировано восемь обзоров в течение четырех лет. Уже первые результаты обсерватории подтвердили ее заявленные характеристики – в мягких рентгеновских лучах телескопом eROSITA получена самая подробная карта Вселенной, на которой обнаружены миллионы объектов (это в несколько раз больше чем было на предыдущих аналогичных картах); в жестком рентгене телескопом ART-XC им. М.Н.Павлинского за первый год работы построена уникально четкая и подробная карта, на которой зарегистрирована почти тысяча самых энергичных источников (важно отметить, что раньше аналогичного объема каталоги в жестких рентгеновских лучах создавались десятилетиями). Согласно плану работ, обсерватория «Спектр-РГ» должна закончить программу обзора всего неба в декабре 2023 года. После этого запланировано как минимум 2,5 года наблюдений наиболее интересных объектов в режиме трехосной стабилизации. Проект «Спектр-УФ» (международное название «Всемирная космическая обсерватория – ультрафиолет») – российская многоцелевая обсерватория (с привлечением иностранных партнеров) для проведения спектроскопических наблюдений небесных объектов с высоким (разрешающая сила 50000) и низким (разрешающая сила 1000) спектральным разрешением, а также для получения изображений небесных объектов с высоким пространственным разрешением (0.1 угл.сек.) в ультрафиолетовой области спектра 115-300 нм. По своим

характеристикам проект превосходит Космический телескоп имени Хаббла (НАСА). В период 2025 } 2035 гг. «Спектр-УФ» будет единственным крупным орбитальным телескопом в мире, работающим в УФ области спектра. Основным инструментом обсерватории является телескоп с диаметром главного зеркала 1.7 м , собирающий свет от небесных объектов для блока спектрографов и блока камер поля. Базовая научная программа проекта включает в себя исследования диффузной барионной составляющей Вселенной, физика аккреции, исследование планет Солнечной системы и атмосфер экзопланет. Запуск обсерватории назначен на 2025 год.

Кроме того, в рамках текущей ФКП запланирована реализация астрофизического эксперимента МВН на МКС (дата запуска 2022 год). Комплекс научной аппаратуры (КНА) МВН «Монитор всего неба» предназначен для высокоточного измерения космического рентгеновского фона. В настоящее время завершается изготовление летного образца МВН, которое должно быть завершено к концу 2021 года. Ожидается, что отправка эксперимента на МКС состоится в 2022 г. Длительность проведения эксперимента – три года.

Среди будущих космических миссий России, запуски которых запланированы на период после 2025 года и даже после 2030 года, необходимо отметить еще один проект из серии «Спектр»: «Спектр-М» или Миллиметрон. В настоящее время это наиболее полноценно (однако при этом все равно недостаточно) финансируемый проект из дальней перспективы российской программы внеатмосферной астрономии. Обсерватория «Миллиметрон» с космическим телескопом с диаметром главного зеркала 10 м, охлаждаемым до низких температур (<10 К) предназначена для исследования разных объектов Вселенной в миллиметровом, субмиллиметровом и дальнем инфракрасном диапазонах спектра, как с ультравысокой чувствительностью (режим одиночного телескопа), так и со сверхвысоким угловым разрешением (в режиме интерферометра) } до 30 наносекунд дуги. Ключевые научные задачи обсерватории «Миллиметрон» } получение уникальной информации о глобальной структуре Вселенной, о строении и эволюции галактик, их ядер, звёзд и планетных систем, а также об органических соединениях в космосе, объектах со сверхсильными гравитационными и электромагнитными полями. Необходимо отметить, что с технологической точки зрения обсерватория очень сложна и в нашей стране отсутствует целый ряд ключевых технологий, в первую очередь, связанных с криогенными технологиями и созданием высокочувствительной регистрирующей аппаратуры. Поэтому для обсерватории Миллиметрон критически важным является международное сотрудничество, в рамках

которого другие страны, в первую очередь Франция, Италия и Япония, могли бы поставить необходимое оборудование и инструменты.

Еще один проект, уже долгое время присутствующий в ФКП, однако без какого-либо существенного продвижения в создании, собственно говоря, самой обсерватории, это «Гамма-400». Эксперимент предназначен для исследования гамма-излучения в диапазоне высоких энергий (0.1-3000 ГэВ) для обеспечения решения следующих научных задач: регистрация космического высокоэнергичного гамма-излучения; поиск особенностей в энергетических спектрах высокоэнергичного гамма-излучения от дискретных и протяженных источников и электрон-позитронной компоненты, которые могут быть связаны с частицами «темной материи»; регистрация высокоэнергичного гамма-излучения от переменных дискретных источников с целью выяснения природы ускорительных процессов элементарных частиц в этих источниках. В состав обсерватории «Гамма-400» входят два инструмента – гамма-телескоп и рентгеновский телескоп, создаваемый по аналогии с телескопом ART-XC проекта «Спектр-РГ», однако с гораздо более высокими характеристиками по чувствительности и спектральному разрешению. Необходимо отметить, что запланированный гамма-телескоп уже морально устарел и большинство его научных задач решены американской обсерваторией Fermi, работающей на орбите с 2008 года, и китайской обсерваторией DAMPE, выведенной на орбиту в 2015 году. Поэтому проект нуждается в серьезном пересмотре и целевых задач и аппаратуры в части гамма-телескопа.

В рамках ФКП-2025 также проводилась разработка эксперимента MBN M-2, предназначенного для установки на МКС с целью решения актуальных фундаментальных задач астрофизики, а также прикладных задач по отработке элементов автономной навигации космических аппаратов по сигналам рентгеновских пульсаров (эскизный проект защищен в 2018 году). Ввиду противоречивой информации о дальнейшей судьбе МКС, крайне неудовлетворительного финансирования научных экспериментов на МКС и бюрократизированности всех процессов, работы по эксперименту приостановлены. Примерно в аналогичной ситуации находится и реализация космического эксперимента «Лири-Б» по многополосной высокоточной фотометрии звезд всего неба.

В заключение кратко остановимся на зарубежных проектах в области внеатмосферной астрономии, которые, как ожидается, будут работать на орбите в ближайшей перспективе. В первую очередь, продолжают свою работу обсерватории Chandra, NuSTAR, Swift, Fermi, Hubble, XMM-Newton, Gaia. Перспективы обсерватории INTEGRAL в настоящее время обсуждаются в ЕКА. На конец 2021

года запланирован запуск первой в своем роде космической рентгеновской обсерватории IXPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) для исследования поляризованного рентгеновского излучения. Миссия нацелена на изучение сложнейших объектов Вселенной, в первую очередь, нейтронных звезд и черных дыр, и измерение их физических параметров с помощью совершенно новых методов и подходов. В начале 2022 года ожидается запуск обсерватории им. Джеймса Вебба. Проект является одним из самых дорогих и долговоздаваемых в истории внеатмосферной астрономии (изначально запуск планировался в 2007 года, а текущая стоимость уже превысила десять миллиардов долларов). Ключевыми задачами проекта являются обнаружение света первых звезд и галактик, сформированных после Большого взрыва, изучение формирования и развития галактик, звезд, планетных систем и происхождения жизни. В 2025 гоу планируется вывести на орбиту обсерваторию eXTP, совместный проект Китая и ЕКА. Задачами миссии будет исследование компактных релятивистских источников в рентгеновском диапазоне с недостижимой раньше чувствительностью. В первую очередь это будет достигаться за счет значительного увеличения собирающей площади инструментов на борту обсерватории. В более далекой перспективе стоит отметить Roman Space Telescope (RST, НАСА), планируемый к запуску в 2027 году. Научные задачи RST относятся к передовым вопросам космологии (исследование темной энергии и понимание причин расширения Вселенной с ускорением) и исследованиям экзопланет. Европейское космическое агентство также активно развивает свою программу внеатмосферной астрономии. В частности, на 2022 год намечен запуск обсерватории EUCLID. Цель миссии частично схожа с целями RST (предполагается даже, что они будут работать какое-то время вместе) и заключается в лучшем понимании свойств тёмной материи и тёмной энергии посредством очень точного измерения ускорения расширения Вселенной. Для этого аппарат будет измерять красные смещения галактик, находящихся на разном расстоянии от Земли, и исследовать связь красного смещения и расстояния. Следующей крупной миссией ЕКА станет обсерватория ATHENA – рентгеновская обсерватория, предназначенная для исследования горячей Вселенной на больших красных смещениях, и картографирования горячих газовых структур. Все это планируется достигнуть за счет новых технологий зеркал и детекторов, которые как ожидается обеспечат обсерватории чувствительность в 100 раз больше, чем у лучших из существующих рентгеновских телескопов, таких как Chandra и XMM-Newton. Ориентировочная дата запуска обсерватории ATHENA 2031 год.

13 Базы данных и информационное обеспечение.

О.Ю. Малков

Деятельность Секции 13 НСА традиционно осуществляется и будет осуществляться в тесном сотрудничестве с Альянсом "Международная виртуальная обсерватория". Собственно, над созданием Виртуальной обсерватории (т.е., комплекса ресурсов астрономических и других данных, работающих как единое целое) работают многие проекты и центры данных по всему миру, а Альянс "Международная виртуальная обсерватория" - это организация, которая обсуждает и согласовывает технические стандарты, необходимые для создания Виртуальной обсерватории. Деятельность Альянса официально одобрена Международным астрономическим союзом (МАС) в качестве общепринятого метода разработки стандартов, связанных с астрономическими данными. Эти стандарты передаются в Комиссию 5 МАС для ратификации. Проводимые дважды в год Сопещания Альянса по интероперабельности (операционной совместимости) стали ключевым элементом в разрешении международных разногласий, а также в обмене идеями и технологиями. В ближайшие годы планируется продолжать следующую деятельность:

Международное (всемирное) сотрудничество в обсуждении и согласовании ключевых астрономических стандартов.

Функционирование форума для дебатов по технологии астрономических данных в целом, а также стандартов Виртуальной обсерватории в частности.

Оперативное достижение соглашений о наборе базовых стандартов: формат обмена таблицами; спецификация для простых сервисов запросов к

каталогам и изображениям; определение метаданных, описывающих ресурсы; словарь для стандартизированных имен колонок; набор стандартов, позволяющих создавать реестры Виртуальной обсерватории.

Поддержка обмена идеями и технологиями Виртуальной обсерватории между ведущими наблюдательными проектами мира.

Разработка (и перевод в обе стороны) учебных пособий по различным астрономическим информационным ресурсам.

Продвижение и популяризация идей Виртуальной обсерватории.

Эта деятельность будет осуществляться в сотрудничестве с Рабочими группами Альянса "Международная виртуальная обсерватория", а именно: "Приложения", "Уровень доступа к данным", "Модель данных", "Грид и веб-сервисы", "Реестры", "Семантика", "Хранение данных", "Образование", "Получение научных знаний", "Администрирование", "Радио", "Солнечная система", "Теория", "Временные ряды", "Стандарты и процессы", "Научные приоритеты".

14 Астрономическое образование и просвещение.

А.В. Засов и В.Г. Сурдин

ОТЧЕТ 2021 г.

Все астрономические центры образования и крупные академические научные центры проводили в течение года работу с преподавателями и со школьниками, как правило, в заочной форме (по причине эпидемии COVID-19).

УЧЕБНИКИ и КУРСЫ

Лапина И. К., Сурдин В. Г. Школа юного астронома. 3-4 классы: учебное пособие для общеобразовательных организаций. 3-е изд. М.: Просвещение, 2021.- 96 с.: ил.,табл. (Внеурочная деятельность) ISBN 978-5-09-070001-6.

Язев, С. А. Астрономия. Солнечная система: учебное пособие для среднего профессионального образования; под науч. ред. В. Г. Сурдина. - 3-е изд., перераб. и

доп. - М.: Юрайт, 2021. - 336 с. - ISBN 978-5-534-08245-6. Гриф УМО СПО. Гриф УМО ВО.

Сурдин В.Г. Понятный космос: от кварка до квазара. Тезаурус астронома. М.: АСТ, 2021. - 384 с. Усл. печ. л. 31,2. Тираж 2000 экз. ISBN 978-5-17-135800-6.

Сурдин В.Г. Астрономия (учебник для медицинских училищ и колледжей) // М.: ГЭОТАР-Медиа, 2021 - 384 с. - ISBN 978-5-9704-6150-1.

В связи с карантинными мероприятиями, вызванными пандемией коронавируса COVID-19, в 2021 году было создано несколько онлайн-курсов по астрономии для школ и внешкольного образования.

Научно-популярные и образовательные книги

Оливер Мортон. Луна: История будущего. Науч. ред. В.Г.Сурдин. М.: Corpus, 2021. - 368 с. ISBN: 978-5-17-121921-5

Сурдин В. Г. Астрономия с Владимиром Сурдиным // М.: АСТ-Аванта, 2021. Серия "Звездный научпоп". Тир. 3000, объем 9 п. л. ISBN 978-5-17-137680-2

Соколов Д. Д. Небесные магниты. М.: Альпина нон-фикшн, 2021, – 160 с. Науч. ред. Д. З. Вибе. ISBN: 978-5-00139-336-8.

Эрик Асфог. Когда у Земли было две Луны. Планеты-каннибалы, ледяные гиганты, грязевые кометы и другие светила ночного неба // М.: Альпина нон-фикшн, 2021. - 474 с. ISBN: 9785001395072 (Науч.ред. В.Г.Сурдин

Стейси Маканулти. Солнце! Одна звезда на миллиард // МИФ, 2021, Ред. - В.Г.Сурдин. 36 с. ISBN: 978-5-00169-375-8.

Стейси Маканулти. Земля! Мои 4,54 миллиарда лет // МИФ, 2021, Ред. - В. Г. Сурдин. 36 с. ISBN: 978-5-00169-376-5.

Фильм «Горизонты Вселенной» // реж. Игорь Кожевников, 2021.

... и ещё много других книг и проектов.

15 Планетные исследования.

О.И. Кораблев

Исследования планет проводятся средствами наземной и внеатмосферной астрономии и, главным образом, с межпланетных космических станций, позволяющих приблизиться к планете и во многих случаях исследовать ее контактными методами.

Одной из тенденций, наблюдающихся в последнее время, является повышенный интерес к исследованиям планетных атмосфер. Астрономические наблюдения и дистанционные измерения атмосфер, когда-то на острие планетной науки, постепенно, с развитием возможностей космических исследований, замещались исследованиями поверхностей и внутреннего строения. Сейчас мы вновь наблюдаем растущий интерес к этой области исследований. Во-первых, есть основания полагать, что состав атмосферы планеты зависит от активных процессов в ее недрах и даже от ее обитаемости. Показателен эпизод с обнаружением фосфина на Венере средствами наземной миллиметровой астрономии (Greaves et al., 2021). Несмотря на спорность этого открытия, оно, несомненно, повлияло на политику ведущих космических агентств. В 2021г для реализации выбраны два проекта НАСА и один проект ЕКА, посвященных исследованиям Венеры. Во-вторых, на современном этапе исследования внесолнечных планет об их природе можно судить по наблюдениям атмосфер и экзосфер. При планировании и интерпретации таких наблюдений используются методы, наработанные для планет Солнечной системы.

В области наземной астрономии, исследования планетных атмосфер ведутся, в основном, в инфракрасном и миллиметровом диапазонах. В ИК-диапазоне используются эшелле-спектрометры с высокой разрешающей силой на ИК-матрицах с большим числом элементов и глубоким охлаждением на средних и больших телескопах. Для уменьшения поглощения водяным паром в атмосфере, важное значение играет высота обсерватории над уровнем моря. В качестве примеров можно привести McDonald Observatory, Texas, 2.7 м и 2000 м над уровнем моря; Canada-France Hawaii Telescope (CFHT), Мауна Кеа, Гавайи, 3.6 м и 4200 м; там же Gemini, 8.1 м, Subaru 8.3 м, Keck 10 м; Very Large Telescope, Серро Паранал, Чили 4x8.2 м и 2600 м. Для наблюдений также используется авиационная обсерватория Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA), телескоп диаметром 2.5 м, круизная высота около 14 км. Один из инструментов на борту, EXES использует ИК-матрицу 1024x1024 и обеспечивает спектральную разрешающую способность 10^5 . Весь прибор охлаждается жидким гелием. Уникальные возможности для исследования планет откроются с вводом в строй JWST.

В мм и субмиллиметровом диапазонах используются антенные системы большой площади (Atacama Large Millimeter Array, ALMA; Very Large Array, VLA).

Российские астрономы практически лишены возможности проводить исследования планет на упомянутых инструментах из-за низкого приоритета планетных предложений и низкой вовлеченности исследователей в соответствующие коллаборации. Эпизодические высоко-рискованные наблюдения, как правило, не приносят ожидаемого результата. Создание в обозримом будущем отечественных астрономических инструментов ИК-диапазона представляется проблематичным из-за их высокой стоимости и экспортных ограничений на детекторы от западных производителей. Как продемонстрировали доклады на ВАК-2021, исследования малых тел Солнечной системы и спутников планет-гигантов успешно проводятся на имеющихся инструментах среднего разрешения, например ИК-спектрометр Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ.

Масштабные исследования планет автоматическими станциями проводятся в отношении практически всех планет и ряда малых тел Солнечной системы. Не касаясь исследований Луны, в настоящее время к Меркурию приближается космический аппарат (КА) ESA и JAXA Bepi Colombo, на орбите Венеры работает КА JAXA Akatsuki, на орбите вокруг Марса находятся восемь работающих спутников, а на поверхности три ровера (два NASA и Китай) и одна посадочная станция (NASA). Исследования Марса проводятся как ведущими космическими агентствами, так и Индией, Китаем, Объединенными Арабскими Эмиратами. На орбите вокруг Юпитера работает КА NASA Juno. В 2020г успешно доставлен образец вещества астероида в рамках проекта JAXA Hayabusa-2, аналогичный проект NASA Lucy близок к завершению. В октябре 2021 стартует проект NASA по исследованию астероида главного пояса. В ближайшем будущем (2022) состоится запуск второй части проекта ЕКА и Роскосмоса ЭкзоМарс 2022, межпланетных станций ESA и NASA для исследования системы Юпитера, проекта NASA Psyche по исследованию металлического астероида главного пояса. В дальнейшем (2024-25) планируется запуск спутника ISRO Chukrayaan-1 для исследований Венеры, КА NASA и JAXA для доставки вещества с астероида и со спутника Марса Фобос.

Из перечисленного многообразия, российские приборы установлены на искусственных спутниках Марса Mars Odyssey (NASA 2001-), Mars Express (ESA 2003-), EхоMars TGO (ESA-Роскосмос 2016-). Большая часть экспериментов посадочной платформы проекта EхоMars RSP (ESA-Роскосмос 2022) реализуется российскими учеными. В будущем, российско-французский прибор планируется для установки на индийский КА Schukrayaan-1 (ISRO 2025). Ограниченное научное участие есть в проекте по исследованию системы Юпитера JUICE (ESA 2022) и проекте по исследованию Марса и Фобоса MMX (JAXA 2024). Запуск следующего планетного проекта, в котором Россия должна играть лидирующую роль, Венера-Д, планируется не ранее 2029г.

Конференция ВАК-2021 продемонстрировала результаты обработки данных космических проектов прошлых лет, в которых было участие российских ученых при поддержке Роскосмоса и проектов других стран. Например, прозвучали доклады о динамике атмосферы Венеры или альbedo планеты в широком спектральном диапазоне по данным Venus Express (ESA 2006-2015) и Akatsuki (JAXA). По изображениям с различных КА, исследованы поверхность Меркурия, обобщены данные о кратерообразовании в интересах сравнительной планетологии. Приоритетные результаты получены по данным приборов на борту EхоMars TGO, ведущего наблюдения с марта 2018 года. Изучены процессы диссипации воды и граница взаимодействия нижних слоев атмосферы с экзосферой. Установлен верхний предел для метана в атмосфере Марса, на порядок ниже, чем «фоновый» уровень метана, зарегистрированный Curiosity, что требует неизвестного механизма разложения газа. В спектральном диапазоне метана обнаружены новые атмосферные поглотители. Открыто новое вещество – хлористый водород. В обоих случаях новые измерения показывают, что мы недостаточно хорошо понимаем атмосферу Марса, и заставляют искать новые процессы в атмосфере или между атмосферой и поверхностью.

Также, на ВАК-2021 прозвучали доклады по темам, традиционно являющимися сильной стороной российской планетной науки, в области небесной механики малых

тел, внешних планет и транснептуновых объектов, внутреннего строения как планет земной группы так и спутников планет-гигантов.

В будущем для продолжения и развития исследований планет Солнечной перспективна реализация микроволновых измерений в радиоастрономической обсерватории на плато Суффа и наблюдения в УФ диапазоне после запуска орбитальной обсерватории Спектр-УФ (WSO-UV).

Как показал опыт создания комплекса научных приборов проекта ЭкзоМарс 2022, наиболее критичным для продолжения и развития исследований с космических аппаратов является отсутствие механизма поддержки разработки новых бортовых приборов. Отдельные научные группы могут использовать опыт участия в проектах других стран или подготовленных недавно проектов по исследованию Луны или Марса, но в других случаях, например для планируемого проекта Венера-Д, необходимы совершенно новые разработки. В рамках ОКР, финансируемых Роскосмосом предусмотрена лишь оценка реализуемости (с точки зрения технологий, доступности компонент и стоимости) и последующее изготовление приборов. Научные аспекты экспериментов и лабораторные макеты остаются за рамками. К началу ОКР, прибор должен быть фактически уже готов, его физическая модель должна стоять на столе. С другой стороны, отчетность по грантам, ориентированная в последние годы лишь на высокорейтинговые публикации, фактически исключает возможность разработки за их счет приборов. Такое положение мешает консолидации научных групп на этапе подготовки и в конечном итоге ставит под удар престижные национальные проекты. Секция отмечает, что в ряде случаев необходимо разрабатывать физические макеты приборов на ранних этапах ОКР, и рекомендует обратиться в Совет по космосу РАН с предложением выработать соответствующее решение.

Мировые тенденции в исследованиях экзопланет

Исследования экзопланет являются наиболее актуальным и востребованным направлением современной астрономии и астрофизики. Сегодня (на сентябрь 2021 г.), благодаря специализированным космическим телескопам и наземным наблюдениям обнаружено и подтверждено существование 4514 планет и еще 4471 являются кандидатами в экзопланеты (<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>). Кратко суммируя основные тенденции, можно утверждать, что в настоящее время, наряду с продолжением поиска новых объектов, наступает эпоха перехода от исследований демографии экзопланет к изучению эволюции их атмосфер с конечной целью открытия обитаемых миров у других звезд. Другими словами, наступает время детального изучения уже найденных экзопланет и их связи с родительскими звездами с помощью всё более сложных научных приборов и всё более реалистичных теоретических моделей.

Для реализации этих целей предполагается активное использование имеющегося оборудования и строящихся больших (с апертурой ~ десятков метров) телескопов. В то же время основные ожидания связаны с наблюдениями на космических телескопах в УФ-, оптическом и ИК- диапазонах. Наблюдения в УФ позволят оценить атмосферные потери и получить представления об эволюции планет, в оптике – провести исследования облаков и дымки, в ИК – определить химический состав атмосферы. Уже сейчас существует значительная группировка космических телескопов (см. Рис.), в значительной степени нацеленных на изучение экзопланет (HST, TESS, Spitzer, Gaia, CHEOPS), и что важно в большинстве планируемых миссий экзопланетные исследования являются важнейшей составной частью научной программы (см., напр., JWST, PLATO ARIEL, Спектр-УФ).

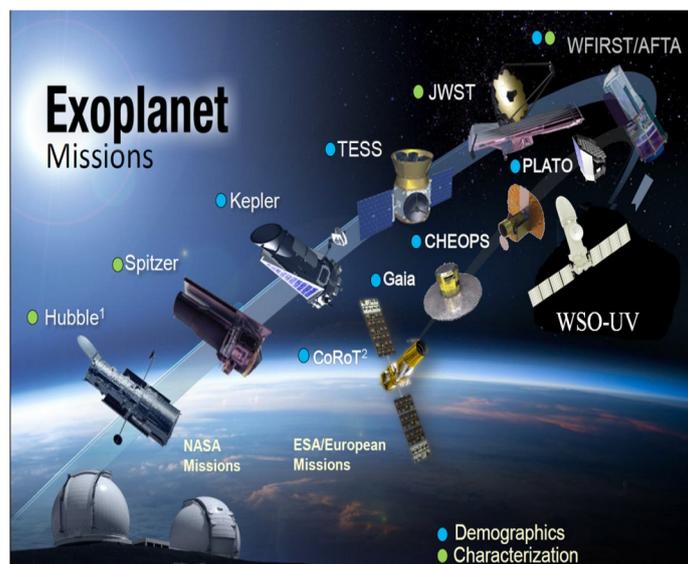


Рис. Карта космических телескопов для наблюдений экзопланет и их атмосфер.

Статус исследований экзопланет в РФ

Начало экзопланетной революции в современной астрономии пришлось, к сожалению, на катастрофические для отечественной науки 1990-е годы, поэтому российские ученые подключились к этим исследованиям относительно поздно. И, тем не менее, во многих российских институтах и обсерваториях работы по экзопланетной тематике ведутся сейчас достаточно активно. И это не только теоретические исследования и численное моделирование, в которых российская наука традиционно сильна, но и в значительной степени экспериментальные работы. Так, например, в CAO РАН установлен и уже увидел первый свет оптоволоконный спектрограф высокого спектрального разрешения. После отладки и калибровки этот спектрограф сможет измерять лучевые скорости ярких звезд с точностью 1–2 м/с, что сравнимо с точностью зарубежных спектрографов. Это позволит обнаруживать планеты в широком диапазоне масс и орбитальных периодов, в том числе планеты земного типа в обитаемой зоне звезд красных карликов. Практически во всех обсерваториях (CAO, КрАО, ИНАСАН, Коуровская обсерватория УрФУ) ведутся наблюдения экзопланет с имеющимся оборудованием. Кроме того, в программах разрабатываемых российских астрофизических миссий (Спектр-УФ, Спектр-М) предусматривается проведение исследований экзопланет.

Важнейшую роль в развитии исследований экзопланет в РФ играет Программа «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет» (соглашение с

Минобрнауки № 075-15-2020-780, руководитель акад. Л.М. Зеленый), сформированная в 2020 г. при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ. Программа включает 13 организаций и свыше 150 научных сотрудников. Программа была составлена с учетом существующего в России задела, прежде всего, хорошей теоретической базы. Так, модели атмосфер, оболочек и магнитосфер экзопланет, разработанные российскими учеными в последнее десятилетие, уже используются во всем мире для интерпретации имеющихся наблюдательных данных, и, несомненно, имеют хорошие шансы на дальнейшее развитие. Наличие в России классической космогонической школы позволяет надеяться на появление прорывных результатов и в этой интереснейшей области науки. Особо хочется отметить тот факт, что многолетние успехи российской науки в исследовании планет Солнечной системы и имеющийся задел методик, моделей, идей обуславливают хорошую стартовую позицию и в изучении экзопланет. Неизменный интерес вызывают вопросы существования зон обитаемости в экзопланетных системах. Ведутся работы по определению критериев необходимого для существования жизни уровня стационарности излучения звезд, возможности экспериментального определения наличия у планеты собственного магнитного поля, играющего важную роль в защите гипотетической жизни на экзопланете, сюда же примыкают проблемы поиска биомаркеров в атмосферах потенциально обитаемых экзопланет. Российский вклад в теоретические исследования существенен – за последние годы по тематике исследований были опубликованы 3 обзора в УФН, несколько обзорных глав в международных коллективных монографиях и 2 российские монографии (М.Я. Маров, И.И. Шевченко. Экзопланеты. Экзопланетология. Ижевск, 2017; Д.В. Бисикало и др. Газовые оболочки экзопланет – горячих юпитеров. М.: Наука, 2020). Вместе с тем, Программа, в первую очередь, нацелена на развитие экспериментальной базы исследований экзопланет в РФ. Реализация Программы позволит дооснастить имеющиеся телескопы оборудованием для наблюдений экзопланет. Конечно, учитывая объемы выделяемого финансирования и темпы развития зарубежной инструментальной базы, это не позволит систематически получать экспериментальные результаты мирового уровня, но даст возможность сократить отставание, и, самое главное, подготовить сеть специализированных инструментов для скоординированных наблюдений после запуска российских астрофизических миссий (Спектр-УФ, Спектр-М).

Во многих научных учреждениях ведутся работы по исследованию экзопланет, не вошедшие во всероссийскую Программу. Примером может служить созданная в

Институте астрономии РАН лаборатория «Исследование звезд с экзопланетами» по гранту Правительства РФ для проведения научных исследований под руководством ведущих ученых (соглашение с Минобрнауки № 075-15-2019-1875). Работы в рамках лаборатории нацелены на исследования образования и эволюции атмосфер для планет земного типа, орбиты которых находятся в зонах потенциальной обитаемости родительских звезд.

Отдельно стоит отметить усилия НСА РАН по проведению конференций и ежегодных школ, призванных объединить и скоординировать действия российских ученых – исследователей экзопланет.

Перспективы исследований в РФ

Исследования экзопланет в РФ в ближайшие годы будет продвигаться в следующих направлениях:

А) Реализация Программы «Теоретические и экспериментальные исследования формирования и эволюции внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет» (соглашение с Минобрнауки № 075-15-2020-780, руководитель акад. Л.М. Зеленый). Основная задача Программы -- интеграция существующих и создаваемых в настоящее время в РФ астрономических инструментов, нацеленных на наблюдения экзопланет, с проводимыми теоретическими исследованиями. Программа исследований по проекту состоит из 13 связанных между собой задач, которые объединены в два блока: наблюдательный и теоретический.

Задачи наблюдательного блока Проекта включают следующие исследования: (1) Поиск новых кандидатов в экзопланеты методами фотометрических транзитов, TTV- и спектроскопическими методами; (2) Исследования околозвездных дисков и диффузного компонента планетных систем методами спектроскопии, фотометрии и фотополяриметрии; (3) Исследование физических характеристик подтвержденных экзопланет методами фотометрии, спектроскопии и спекл-интерферометрии; (4) Разработка методов прямого наблюдения экзопланет. Звездный коронограф, адаптивная оптика, коррекция волнового фронта; (5) Виртуальная обсерватория экзопланет для статистических исследований характеристик экзопланет; (6) Поддержка наблюдательной программы по экзопланетам внеатмосферной обсерватории «Спектр-УФ».

Теоретический блок посвящен моделированию и развитию теории формирования внесолнечных планетных систем и характеристик экзопланет. Подобные модели важны не только сами по себе, но и необходимы для интерпретации наблюдательных данных. Задачи теоретического блока включают проведение следующих исследований: (1) Космогония: моделирование процессов формирования и изучение динамических особенностей экзопланетных систем; (2) Протопланетные диски; (3) Звезды с экзопланетами; (4) Аэрономические модели атмосфер экзопланет; (5) Исследование и моделирование газовых, плазменных и пылевых оболочек экзопланет; (6) Развитие моделей генерации магнитных полей, планетных магнитосфер и сопутствующих электромагнитных излучений для экзопланет различных типов; (7) Исследование планет и малых тел в Солнечной системе с точки зрения наук об экзопланетах.

Исследования теоретической части проекта фактически покрывают весь жизненный цикл экзопланет: от их образования из протопланетных дисков, формирования газовых, плазменных и пылевых оболочек, возможной генерации собственных магнитных полей и электромагнитных излучений при взаимодействии этих полей со звездным ветром. Важную роль будет иметь сопоставление обширных данных, имеющихся сейчас о планетах Солнечной системы при изучении их возможных экзопланетных аналогов. Поскольку теоретические исследования экзопланет уже сейчас ведутся практически во всех астрономических институтах России на высоком уровне, то ожидается, что решение задач этого блока даст результаты мирового уровня.

Работы, запланированные в рамках Программы, позволят помочь в формулировке задач для научной программы проекта «Спектр-УФ» в части исследования экзопланет и создадут основу для его наземного сопровождения.

Б) Запуск в 2025 г. космического телескопа Спектр-УФ (World Space Observatory-UV)) создаст реальные перспективы получения прорывных результатов и выведет исследования экзопланет в РФ на мировой уровень.

Спектр-УФ — 1.7-метровый телескоп, предназначенный для исследований в ультрафиолетовой части спектра. Проект международный - в его работе принимают непосредственное участие Испания и Япония, кроме того, отмечается большой интерес со стороны международного астрономического сообщества. Его чувствительность соответствует чувствительности космического телескопа им. Хаббла, однако особенности орбиты и свойства изготавливаемых спектрографов позволят впервые

провести целый ряд уникальных наблюдений экзопланет и их атмосфер. Список научных задач Спектр-УФ находится в стадии формирования и будет уточнен по результатам реализации Программы (см. п. А), однако уже понятно, что имеющееся оборудование позволит сделать следующий шаг в изучении физико-химического состава атмосфер в Солнечной и внесолнечных планетных системах. В частности, одной из наиболее интригующих задач станет поиск биомаркеров, которые могут свидетельствовать о наличии жизни на экзопланетах, так как именно в ультрафиолетовой области спектра находятся линии излучения и поглощения кислорода и других потенциально важных элементов. Российско-японский спектрограф специально создается для исследования кислорода в атмосферах экзопланет. Важно отметить, что реализация Программы (см. п. А) позволит организовать наземное сопровождение миссии.

В) Решение целого ряда разноплановых задач, необходимых для обеспечения последовательного развития данного раздела астрофизики. Это и задачи, нацеленные на относительно далекую перспективу – к ним, в частности, относится подготовка задач космического проекта «Спектр-М», а также НИРы по будущим специализированным космическим миссиям. Это и среднесрочные задачи, к которым можно отнести вступление РФ в ESO, так как это позволит получить доступ к современным наземным инструментам, и, следовательно, обеспечит прогресс в исследованиях и экзопланет. Вместе с тем, это и сиюминутные задачи по образовательной деятельности (молодежные школы), по организации конференций, по организации международного сотрудничества, и пр. Реализация этой группы планов обеспечит стабильное развитие исследований экзопланет в РФ.

17 Небесная механика

Ю.Д. Медведев.

В современных исследованиях по небесной механике можно выделить несколько направлений:

1. Первое связано с появлением новых, высокоточных и всеволновых наблюдений, требующих построения более полных, включающих различные тонкие эффекты динамических моделей движения небесных тел. Здесь нужно отметить работы ИПА РАН и ГАО РАН. В ИПА РАН продолжают работы по совершенствованию

динамической модели движения планет Солнечной системы. Сложная структура Солнечной системы, включающая планеты и множество малых тел, вызывает необходимость учета при построении высокоточных эфемерид планет Солнечной системы и Луны гравитационного влияния всех, даже небольших объектов [11]. Новые более точные наблюдения комет требуют учета смещения фотоцентра, вызываемого выбросом газа и пыли с поверхностей комет [1]. Радиолокационные наблюдения, проводимые в ИПА совместно с обсерваторией Голдстоун, дали возможность уточнить размеры и период вращения ряда астероидов, определить более надежно их орбиты. Зарегистрированы и обработаны эхосигналы от 12 астероидов и Луны [20]. Исследованы динамические особенности астероида 11 'Oumuamua –первого межзвездного небесного тела, проникшего в Солнечную систему и сблизившегося с Землей. Показано, что сильно вытянутая форма астероида может быть объяснена столкновениями с высокоскоростными частицами пыли в межзвездном пространстве [18]. В ГАИШ создана уникальная база данных всех опубликованных в мире наблюдений естественных спутников Марса, Юпитера, Сатурна, Урана, Нептуна и Плутона, а также спутников астероидов [2]. Разработаны модели движения и эфемериды всех 142 далеких спутников больших планет [3]. В ГАО РАН успешно развиваются работы по исследованию резонансных эффектов во вращательной динамике спутников планет [8], релятивистских эффектов (геодезической прецессии и нутации, вместе составляющих геодезическое вращение) во вращении небесных тел [10]. Баллистическим центром ИПМ им. М.В. Келдыша РАН выполнен большой объем работ по обеспечению успешного вывода космического аппарата «Спектр-РГ» на гало-орбиту в окрестности точки L2 системы «Земля-Солнца». Это первый перелет на гало-орбиту в практике отечественной космонавтики [14].

2. Второе направление связано с разработкой аналитических и полуаналитических методов исследования динамики небесных тел. Необходимо отметить работы ИПМ им. М.В. Келдыша РАН и СПбГУ. Получены новые важные результаты в классической ограниченной задаче трех тел, позволяющие описывать основные особенности движения малых естественных и искусственных тел на больших интервалах времени, недоступных численному интегрированию. Введено понятие поверхности минимальной скорости, являющейся модификацией поверхности

нулевой скорости (поверхности Хилла), играющей ключевую роль в описании области возможных движений [4]. Проведено качественное исследование возможных режимов движения малых небесных тел, движущихся в окрестности орбиты большой планеты примерно с тем же значением периода обращения, но в противоположном по отношению к планете направлении [15]. Для внутреннего и внешнего вариантов ограниченной эллиптической двукратно осредненной задачи трех тел получены специальные разложения возмущающей функции с точностью до четвертой степени включительно относительно малого параметра. На основе этих разложений выявлены особенности эволюции некоторых астероидных орбит, а также тел малой массы в экзопланетной системе GJ 3512 [17]. Исследована динамика астероидов-троянец. Объяснено, почему некоторые астероиды-троянцы чередуют движение по орбитам, охватывающим «ведущую» треугольную точку либрации L4, с движением по орбитам, охватывающим «отстающую» точку либрации L5 [15]. Важной задачей является исследование динамических особенностей экзопланет. Исследования, проводимые в ИКИ, ГЕОХИ, ГАО и СПбГУ, дали возможность проанализировать важнейшие явления, определяющие динамическую структуру планетных систем, изучить влияние резонансов и миграции на динамическую устойчивость систем. Рассмотрены и обобщены основные динамические и физические параметры экзопланетных систем и их корреляции, критерии устойчивости планетных систем как одиночных, так и двойных звезд. С использованием методов теории симплектических отображений в СПбГУ и ГАО РАН впервые построена теория планетных хаотических зон в планетезимальных дисках, позволяющая аналитически оценивать основные параметры этих зон – радиальные размеры, скорости расчистки, ляпуновские шкалы времени [12]; путем массовых численных экспериментов получены оценки параметров планетных хаотических зон, согласующиеся с теорией. Выявлен эффект медленного приливного распада циркумбинарных планетных систем [13].

3. Третье направление связано с проблемой астероидно-кометной опасностью и космического мусора. В ИНАСАН разработан уникальный космический проект СОДА (Система Обнаружения Дневных Астероидов), предназначенный для обнаружения опасных космических тел, сближающихся с Землей со стороны Солнца. Такие тела невозможно наблюдать с помощью как наземных, так и летающих в ближнем космосе

телескопов. Размещение двух космических аппаратов в окрестности точки либрации L1 на орбитах с различными фазами позволяет существенно (до нескольких километров) повысить точность определения орбиты опасного тела и координат точки входа тела в земную атмосферу [5]. В Уральском федеральном университете исследована динамическая эволюция космического мусора в окрестности орбит спутников глобальных навигационных систем [6]. Кроме того, в этом университете на основе анализа метрик Холшевникова выполнен поиск молодых, возрастом менее 2 миллионов лет, пар и групп астероидов на близких орбитах. Они интересны тем, что физические процессы еще не успели значительно изменить свойства поверхности астероидов, а с точки зрения динамики система еще хранит сведения о своем происхождении [7]. В ИПА разработана быстрая методика оценки вероятности столкновения малых тел с Землей, позволяющая оперативно и с высокой надёжностью выявлять опасные для Земли небесные тела. Это линейный метод оценки вероятности столкновения околоземных астероидов с Землей, в котором используется специальная криволинейная система координат, связанная с номинальной орбитой астероида [19]. В СПбГУ и ГАО РАН разработан эффективный алгоритм вычисления межорбитального параметра расстояния MOID (Minimum orbit intersection distance), позволяющий выявлять возможные столкновения астероидов друг с другом и планетами [9].

Перспективы

Актуальным направлением остается развитие современных аналитических и численных методов небесной механики в приложении к исследованиям динамики экзопланетных систем. К настоящему времени, многопланетных (с числом планет две и более) систем открыто уже более 800. Их долговременная динамика и устойчивость представляют значительный интерес, в особенности в сопоставлении с динамическими характеристиками нашей Солнечной системы. Большой, если не определяющий, интерес представляют резонансные эффекты (резонансы средних движений и вековые резонансы), а также проявления эффекта Лидова-Козаи в планетных системах как одиночных, так и кратных звезд.

Необходимо развитие методов долговременного прогнозирования динамики астероидов и комет, сближающихся с Землей, и других потенциально опасных объектов, а также космического мусора в околоземном пространстве, в связи с

высокой научной и общественной значимостью проблемы астероидно-кометной опасности. Это комплексная проблема, требующая массовых исследований динамической эволюции не только выявленных опасных тел, но и в целом многочисленного (только астероидов открыто уже около миллиона) населения малых тел Солнечной системы.

В ближайшее время будет введен крупный 8-метровый телескоп LSST (The Large Synoptic Survey Telescope). Он будет способен каждые 15 секунд осматривать участок неба в 50 раз превышающий по площади полную Луну с регистрацией объектов до 24.5 звездной величины. Цифровая камера телескопа будет иметь $3 \cdot 10^9$ пикселей. Это потребует существенной перестройки работы существующих центров по сбору, каталогизации и обработке наблюдений, а также по определению надежных орбит вновь открываемых небесных тел. Организация мониторинга за потенциально опасными для Земли и Луны объектами также претерпит изменения, поскольку потребует оперативного выявления наиболее опасных небесных тел.

Важным направлением является дальнейшее развитие методов радиолокации астероидов и комет, а также методов обработки этих наблюдений, позволяющих уточнять физические и динамические характеристики астероидов и комет, сближающихся с Землей, а значит более точно предсказывать их движение.

Литература

1. Chernetenko Yu.A., Medvedev Yu.D. Parameters of dust jets in comet Encke's coma // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. V. 493. Is. 4. P. 5499–5505. DOI: doi.org/10.1093/mnras/staa619
2. Emelyanov N. V., Drozdov A. E. Asteroid satellite ephemeride service. Mutual occultations and eclipses // Icarus. 2021. V. 355. P. 114160. DOI: 10.1016/j.icarus.2020.114160
3. Emelyanov N. V., Drozdov A. E. Determination of the orbits of 62 moons of asteroids based on astrometric observations // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2020. V. 494. P. 2410–2416. DOI:10.1093/mnras/staa784

4. Kholoshevnikov K. V., Titov V. B. Minimal Velocity Surface in a Restricted Circular Three-Body Problem // *Vestnik St. Petersburg University, Mathematics*. 2020.V. 53.P. 473–479.DOI: 10.1134/S106345412004007X
5. Kovalenko, I. D., Shustov, B. M., Eismont, N. A. Trajectory design for the System of Observation of Daytime Asteroids // *ActaAstronautica*. 2018.V. 148.P. 205-209. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.05.007
6. Kuznetsov E.D., Avvakumova E.A. Dynamical evolution of space debris in the vicinity of GNSS regions // *ActaAstronautica*. 2019. V. 158. P. 140–147. DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.02.001
7. Kuznetsov E.D., Rosaev A.E., Plavalova E., Safronova V.S., Vasileva M.A. A Search for Young Asteroid Pairs with Close Orbits // *Solar System Research*. 2020. V. 54. № 3. P. 236–252. DOI: 10.1134/S0038094620030077
8. Lages J., Shevchenko I.I., Rollin G. Chaotic dynamics around cometary nuclei // *Icarus*. 2018. V. 307. P. 391–399. DOI: doi.org/10.1016/j.icarus.2017.10.035
9. Mikryukov D.V., Baluev R.V. A lower bound of the distance between two elliptic orbits // *Celestial Mechanics & Dynamical Astronomy* . 2019. V. 131. Article id: 28.DOI: doi.org/10.1007/s10569-019-9907-3
10. Pashkevich V. V., Vershkov A. N., Mel'nikov A. V. Rotational Dynamics of the Inner Satellites of Jupiter // *Solar System Research*. 2021. V.55. № 1. P.47-60. DOI: 10.1134/S0038094620330035
11. Pitjeva E. V., Pitjev N. P. Mass of the Kuiper belt // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2018. V. 130, Is.9. Article id: 57. DOI: 10.1007/s10569-018-9853-5
12. Shevchenko I.I. Lyapunov and clearing timescales in planetary chaotic zones // *Astronomical Journal*. 2020. V. 160, id. 212. DOI: 10.3847/1538-3881/abb6f2
13. Shevchenko I.I. Tidal decay of circumbinary planetary systems // *Astronomical Journal*. 2018. V. 156. id. 52. DOI:10.3847/1538-3881/aaccf9
14. Sunyaev, R. ;Arefiev, V. ; Babushkin, V. et al. The SRG X-ray orbital observatory, its telescopes and first scientific results // eprint arXiv:2104.13267. 2021
15. Sidorenko V.V. Dynamics of “jumping” Trojans: a perturbative treatment // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2018. V.130. Article id: 7. DOI: doi.org/10.1007/s10569-018-9860-6

16. Sidorenko V.V. A perturbative treatment of the retrograde co-orbital motion // *Astronomical Journal*. 2020. V. 160. Article id: 257. DOI: doi.org/10.3847/1538-3881/abbb38
17. Vashkov'yak M.A. Some Peculiarities of the Evolution of Orbits in the Satellite Restricted. Elliptic Doubly Averaged Three-Body Problem // *Solar System Research*. 2020. V. 54. № 1. P. 49-63. DOI: 10.1134/S0038094620010098
18. Vavilov D.E., Medvedev Yu.D. Dust bombardment can explain the extremely elongated shape of 1I/Oumuamua and the lack of interstellar objects // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*: 2019. V.484. Letters.L75-L78. DOI:10.1093/mnrasl/sly244
19. Vavilov D. E. The partial banana mapping: a robust linear method for impact probability estimation // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020. V. 492. Is. 3. P. 4546–4552. DOI: doi.org/10.1093/mnras/stz3540
20. <http://iaaras.ru/observations/echo/>

Дополнительный материал представленный Б.М. Шустовым

Общие тенденции XXI века в развитии технологии и методов астрономических исследований:

7. Мы вступили в эпоху многоканальной астрономии (Multi- messenger Astronomy).
8. Астрономия становится наукой, позволяющей наблюдения с высоким временным разрешением быстро протекающих (transient) процессов во Вселенной (Time-domain Astronomy).
9. В астрономии широко развиваются технологии работы с большими данными (Big Data), что объясняет появление такого термина как Data Driven Astronomy.
10. Астрономия (астрофизика, астрохимия) – интенсивно развиваются в «лабораторном» варианте (Laboratory Astrophysics).

11. Отмечается тенденция ко все более широкому привлечению (вовлечению) в астрономические исследования любителей (citizen science).

Основные мировые тенденции в наземной оптической астрономии

1. Строительство и ввод в эксплуатацию крупных и сверхкрупных телескопов и инструментов (TNT, EELT и т.д.). Широко используются преимущества кооперативного подхода.
2. Большой акцент сделан на телескопы обзорного типа (PanSTARRS, LSST и т.д.).
3. Развитие сетей, в том числе роботизированных.

Основные мировые тенденции в наземной радиоастрономии

1. Строительство и ввод в эксплуатацию крупных и сверхкрупных (массивов) инструментов (SKA, LOFAR и т.д.). Широко используются преимущества кооперативного подхода.
2. Осуществлен прорыв в направлении субмиллиметровой/ миллиметровой астрономии (наиболее яркий пример – ALMA)

Основные мировые тенденции во внеатмосферной астрономии

21. Подготовка запусков в космос крупных телескопов (JWST, WFIRST, и т.д.).
22. Большой вклад обзорных (всенебесных) проектов (GAIA, «Спектр-РГ» и т.д.).
23. Запуск в космос КА, позволяющих осуществлять космическую радиоинтерферометрию («Спектр-Р» и т.д.).
24. Быстрое развитие направления науки с малыми КА (даже с кубсатами).

Состояние дел в наземной астрономии в России

Из 34 астрономических исследовательских структур России 27 имеют собственную инфраструктуру для проведения наземных астрономических наблюдений. Это оптические телескопы, радиотелескопы, полигоны, специальные аппаратные комплексы и др. 11 объектов имеют статус «Уникальная научная установка», часть из них } Центры коллективного пользования. Числа вроде бы солидные, но в последние нескольких десятков лет в России развитие наблюдательных средств астрономии почти не происходило. Последнее крупное вложение было сделано в 70-е годы

прошлого века: были построены БТА и кольцевой радиотелескоп РАТАН-600 диаметром 600 м. Комплекс «Квазар-КВО» не в счет, т.к. строился не для астрономических исследований.

В ряду оптических телескопов апертурой крупнее 2 метров кроме БТА работают 2,6-метровый телескоп Крымской астрофизической обсерватории РАН, 2,5-метровый телескоп Кисловодской обсерватории МГУ им. М.В.Ломоносова и 2-метровый телескоп совместной российско-украинской обсерватории на пике Терскол. Общая площадь зеркал российских телескопов составляет около 42 кв. м или менее 3% от площади зеркал оптических телескопов в мире. Еще есть две сети малоапертурных (50см) телескопов: доказавшая свою эффективность роботизированная сеть «Мастер» (ГАИШ МГУ им. М.В.Ломоносова), основная задача которой — наблюдения транзиентов (гл. образом, источников гамма-всплесков), и сеть ISON (ИПМ РАН), основная задача которой — работа в качестве привлеченного (Роскосмосом) средства по контролю околоземного космического пространства в зоне геостационарной орбиты. Обе сети эпизодически используются также для наблюдения малых тел Солнечной системы.

Как отмечалось на заседаниях ВАК-2021 в России инфраструктура радиоастрономических исследований находится в относительно неудовлетворительном состоянии («есть несколько крупных антенн, но они не являются телескопами»). В последние годы развивается программа использования инструментов сети «Квазар-КВО» для астрофизических исследований. Отсутствуют телескопы миллиметрового (субмиллиметрового) диапазона.

Однако есть положительные моменты:

Сделан очень серьезный шаг в развитии гелиофизики. Начато строительство гелиогеофизического комплекса РАН, оснащенного крупными инструментами, в частности Солнечным телескопом-коронографом КСТ-3 апертурой 3 м.

Отмечается существенный прогресс в развитии отечественных проектов в нейтринной и гамма-астрономии (например – большой прогресс в развитии Байкальской нейтринной обсерватории, запуск установки TAIGA)

Завершается создание современного спектрографа высокого разрешения на БТА. Это пока единственный инструмент с характеристиками передового мирового уровня.

Состояние дел во внеатмосферной астрономии в России

ВАК-2021 прошел под знаком большого успеха проекта рентгеновской обсерватории «Спектр-РГ».

Тем не менее отмечалось, что фундаментальные космические исследования имеют в Роскосмосе низкий приоритет и во всех ситуациях с урезанием общего финансирования (секвестрах) прежде всего и сильнее всего страдает именно это направление Федеральной космической программы.

Российские перспективы

В соответствии с отмеченными мировыми тенденциями развития астрономических технологий и, принимая во внимание состояние дел в России, участники заседаний ВАК-2021 высказывали (или поддерживали) следующие предложения:

1. Нужно пытаться вступать в кооперативные проекты по сверхкрупным проектам (вступление в ESO),
2. Одновременно с п. 1 (перспектива которого неоднозначна) нужно поддерживать, развивать и создавать наиболее перспективные в научном и научно-образовательном плане инструментальные комплексы.

Прежде всего:

- Продвигать проект отечественного обзорного телескопа апертурой ~4 м.
- Начать реальную работу по созданию отечественного мм/субмм телескопа (телескопов) современного уровня

3. Необходимо продвижение в общественное сознание (и в понимания того, что астрономия – не просто фундаментальная наука, но и важнейшая мировоззренческая и наука с большим практическим потенциалом. Примеры практического применения: развитие систем координатно-временного

обеспечения, создание системы исследования и парирования космических угроз и т.д.

4. В области внеатмосферной астрономии и космических исследований назрели шаги, в т.ч.:

- Изменение организации фундаментальных космических исследований, в частности, изменения некоторых федеральных законов о закупках, о контроле и т.д., нацеленных на серийное производство.
- Прекращение устоявшейся практики первоочередного секвестирования программы ФКИ.
- Создание центра космического приборостроения.