



2-ой Российско-Узбекистанский
научный семинар

**МЕЖДУНАРОДНАЯ
РАДИООБСЕРВАТОРИЯ
НА ПЛАТО СУФФА:
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МИЛЛИМЕТРОВОЙ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ
АСТРОНОМИИ**

19–20 декабря 2022 г.
Самарканд, Узбекистан

Москва
2023

УДК 521; 520.1
ББК 22.632
М 43

2-ой Российско-Узбекистанский научный семинар. Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии / М.: РАН, 2023. – 56 с.



ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО
ПРЕЗИДЕНТА РАН АКАДЕМИКА РАН
Г.Я. КРАСНИКОВА



Ленинский проспект, 14, Москва, Россия, 119991, тел.: +7 495 954-35-06, факс: +7 495 952-41-90, электронная почта: G_Krasnikov@rian.ru

«16» декабря 2022 г.

Участникам российско-
узбекистанского научного семинара
«Проект «Суффа» и перспективы
развития миллиметровой
и субмиллиметровой астрономии»

Уважаемые коллеги!

От лица Российской академии наук рад приветствовать Вас на научном семинаре, посвященном перспективам развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии и, в частности, проекту «Суффа»! Выражаю свою благодарность президенту Академии наук Республики Узбекистан иностранному члену РАН Б.С. Юлдашеву, а также ректору Самаркандского государственного университета Р.И. Халмурадову за поддержку идеи о проведении семинара и содействие в его подготовке.

Сегодня в Самарканде собрались ведущие ученые России и Узбекистана, чтобы представить доклады по перспективным направлениям радиоастрономии и обменяться мнениями об актуальных задачах астрофизики и исследованиях межзвездной среды и тел Солнечной системы.

Важной задачей, стоящей перед Вами, является разработка программы научных исследований на международной радиоастрономической обсерватории, создаваемой на плато Суффа в соответствии с межправительственным соглашением. Утверждение научной программы станет важной вехой на пути к полноценному запуску наблюдений на плато.

Желаю Вам, коллеги, плодотворной работы на семинаре, интересных и насыщенных дискуссий, а также сердечно поздравляю Вас с наступающими новогодними праздниками!

Президент РАН
академик РАН

Г.Я. Красников

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО
ПРЕЗИДЕНТА АКАДЕМИИ НАУК
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН АКАДЕМИКА
Б.С. ЮЛДАШЕВА



O'ZBEKISTON RESPUBLIKASI FANLAR AKADEMIYASI

📍 100047, Toshkent shahri, akad. Yahyo G'ulomov ko'chasi, 70-uy. ☎ (+998) 71 2335967
🌐 www.academy.uz ✉ devonxona@academy.uz control@academy.uz

17 декабря 2022г.

Участникам российско-узбекистанского научного семинара «Проект «Суффа» и перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии»

Уважаемые коллеги!

От имени Академии наук Республики Узбекистан я рад приветствовать Вас – участников российско-узбекистанского научного семинара «Проект «Суффа» и перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии». Глубоко символично, что этот семинар проходит в Самарканде, который славится не только своими историческими памятниками, но и являлся астрономической столицей мира во времена Мирзо Улугбека.

Радиоастрономия является одним из самых бурно развивающихся направлений астрономии. Именно в этой области в ближайшее время ожидаются прорывные открытия. Достаточно сказать, что за открытия в области радиоастрономии было присуждено пять Нобелевских премий. Кроме того, несколько лет назад сетью радиотелескопов проекта Телескоп горизонта событий (ЭНТ) было сделано важное открытие: в 2019 г. были опубликованы результаты регистрации силуэта черной дыры M87* в центре эллиптической галактики Мессье 87, а в 2022г. черной дыры Стрелец A* (Sgr A*) в Центре нашей Галактики Млечный путь. По нашей просьбе специалисты этого проекта рассчитали насколько могла бы повыситься разрешающая способность сети ЭНТ если бы в нее вошел радиотелескоп РТ-70 на плато «Суффа». Оказалось на 15% ! Это показывает насколько важно заполнение пустующего сектора радиотелескопов в Азии.

Благодаря поддержке Президентов Узбекистана и России после длительного перерыва программе запуска МРАО «Суффа» был придан новый импульс. В ноябре 2021 г. в Москве подписан Протокол о внесении изменений в Соглашение о создании МРАО «Суффа». Летом 2022г. Постановлениями Президентов двух стран Межправительственный Протокол вступил в силу.

Желаю Вам, дорогие коллеги, плодотворной работы во имя процветания науки!

Президент АН РУз
Академик

Б.С. Юлдашев

ПРИВЕТСТВЕННОЕ СЛОВО
ПОЛНОМОЧНОГО ПРЕДСТАВИТЕЛЯ ПРАВИТЕЛЬСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В КОМИТЕТЕ
ПОЛНОМОЧНЫХ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ МРАО «СУФФА»,
ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТА РАН АКАДЕМИКА РАН
В.Я. ПАНЧЕНКО



Ленинский просп., 14, Москва, ГСП-1, 119991, Телетайп/Телекс 41 1095 ANS RU,
Факс (495) 954-33-20 (Ленинский просп., 14), (495) 938-18-44 (Ленинский просп., 32а)
Справочное бюро (495) 938-03-09, <http://www.ras.ru>

№ _____
На № _____

Участникам российско-
узбекстанского научного семинара
«Проект «Суффа» и перспективы
развития миллиметровой
и субмиллиметровой астрономии»

Глубокоуважаемые коллеги!

Позвольте поприветствовать вас от лица Президиума Российской академии наук на российско-узбекстанском научном семинаре «Проект «Суффа» и перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии». Научное сотрудничество между Россией и Узбекистаном основано на общих традициях и приоритетах, которые многие десятилетия объединяют исследовательские коллективы.

С космосом связан целый ряд совместных достижений в самых разных отраслях научного знания. В качестве примера на ум приходит история о «космическом» хлопчатнике, выращенном на орбите во время полета «Салюта-7» Владимиром Джанибековым и Виктором Савиных. Растения, которые космонавты вернули на землю, обладали рекордной длиной волокна – до 15 см, в то время как средняя длина других ценных сортов составляет до 7 см. Этот новый элитный сорт выращивается по сегодняшний день в Узбекистане.

Закономерно, что Россия и Узбекистан придают большое значение реализации глобальных проектов в сфере изучения космоса, в том числе созданию радиоастрономической обсерватории «Суффа». Её строительство началось еще в 1981 году и неоднократно замораживалось, однако для обеих сторон неизменным оставалось понимание важности этого проекта для развития субмиллиметровой астрономии и атмосферной оптики.

В частности, с развитием современных технологий, в том числе и терагерцового диапазона частот, перед нами открывается уникальная возможность совмещения радиотелескопа «Суффа» с подобными приемниками в разных странах мира для создания сети астрономических инструментов, нацеленной на исследования космоса.

Уверен, что результаты глубоких научных обсуждений на семинаре помогут нам выбрать правильный вектор развития проекта «Суффа». Выражаю свою глубокую признательность Оргкомитету семинара под руководством моих коллег Шухрата Эгамбердиева и Александра Шкуринова.

Желаю Вам успешной работы от своего имени и по поручению президента РАН академика Г.Я. Красникова!

Полномочный представитель Правительства
Российской Федерации в Комитете
полномочных представителей МРАО «Суффа»,
вице-президент РАН
академик РАН

В.Я. Панченко

СОСТАВ ОРГАНИЗАЦИОННОГО КОМИТЕТА
2-ГО РОССИЙСКО-УЗБЕКИСТАНСКОГО
НАУЧНОГО СЕМИНАРА
«МЕЖДУНАРОДНАЯ РАДИООБСЕРВАТОРИЯ
НА ПЛАТО СУФФА: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ
АСТРОНОМИИ

С Российской стороны

Председатель
чл.-корр. РАН А.П. Шкуринов

Заместитель председателя
А.А. Варфоломеев

Ученый секретарь
А.А. Лотин

В.Ф. Вдовин

В.К. Дубрович

Ю.В. Дудник

Ю.В. Прокофьева

А.Г. Рудницкий

А.А. Чугунов

С Узбекстанской стороны

Председатель
академик Ш.А. Эгамбердиев

Заместитель председателя
Г.И. Шанин

Ученый секретарь
А.А. Абдужаббаров

А.Р. Ахатов

Б.Ж. Ахмедов

А.Н. Сафаров

Ю.А. Тиллаев

Р.И. Халмурадов

А.С. Ходжаев

СОДЕРЖАНИЕ

Фундаментальные астрофизические задачи миллиметровой и субмиллиметровой астрономии <i>К.А. Постнов, А.М. Черепашук</i>	10
Астрономия в Узбекистане: прошлое, настоящее, будущее <i>Ш.А. Эгамбердиев</i>	13
Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия в мире и актуальные задачи исследований межзвёздной среды и тел Солнечной системы <i>И.И. Зинченко, А.С. Ходжаев, Б.М. Шустов</i>	16
Космическая миллиметровая астрономия: от Радиоастрона к Миллиметру через James Webb Telescope <i>Н.Н. Колачевский</i>	19
СИС-приёмник диапазона 211-275 ГГц для радиоастрономии <i>В. Кошелец, К. Рудаков, А. Худченко, Л. Филиппенко</i>	22
Влияние распределения интенсивности фемтосекундного лазерного излучения на процесс филаментации при распространении в атмосфере <i>С.А. Бахрамов, А.К. Касимов</i>	25
Перспективы развития субтерагерцовой астрономии в Российской Федерации <i>А.Г. Рудницкий, С.Ф. Лихачев</i>	28
Проблемы электромагнитной совместимости, нормативная база и практика создания субТГц обсерваторий <i>В.Ф. Вдовин, И.В. Леснов</i>	32
Фемтосекундные филаменты как новый тип опорных лазерных источников для астрономической адаптивной оптики <i>О.Г. Косарева, Н.А. Панов, А.П. Шкуринов</i>	37
Теоретическая астрофизика в Узбекистане <i>Б.Ж. Ахмедов</i>	39

Современное состояние организации Международной радиоастрономической обсерватории на плато Суффа <i>Г.И. Шанин</i>	42
Влияние корональных выбросов массы на космическую погоду <i>З.Д. Миртошев</i>	46
Механизм дополнительного нагрева коры нейтронной звезды радиоизлучением из внутренних слоёв <i>П.С. Таджимуратов</i>	50
Приемники ТГц частотного диапазона <i>В.Л. Вакс</i>	53

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ МИЛЛИМЕТРОВОЙ И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ АСТРОНОМИИ

К.А. Постнов, А.М. Черепашчук

Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, МГУ
e-mail: pk@sai.msu.ru, cherepashchuk@gmail.com

Аннотация

Обсуждаются основные астрофизические задачи, стоящие перед современной мм и субмм астрономией в области фундаментальной гравитации – космологии, физики сверхмассивных черных дыр в ядрах галактик и квазаров, эволюции галактик. Кратко затрагиваются поиски экзотических объектов – кротовых нор и первичных черных дыр методами мм астрономии.

Введение

Водяной пар в земная атмосфера позволяет наблюдать космические объекты наземными антеннами в области длин волн от ~ 1 до 300 мкм. В настоящее время в местах с подходящим астроклиматом для мм и субмм астрономии работают одиночные антенны (Гавайские о-ва Caltech Submillimeter Observatory, James Clerk Maxwell Telescope, пустыня Атаками в Чили – Llano de Chajantor Observatory APEX, Южный полюс – South Pole Telescope, и др.) и решетки антенн (ALMA в Чили, SMA на Гавайских о-вах). Для получения высокого углового разрешения используется техника наблюдений РСДБ, имеющая огромную перспективу как в наземных наблюдениях [1], так и с помощью космических аппаратов (проект Миллиметрон, Россия, [2]). Фундаментальные астрофизические задачи, решаемые в действующих и будущих проектах, в первую очередь относятся к области гравитации, космологии и изучения физики межзвездной среды (см. тж. Зинченко И.И. в этом сборнике).

1. Спектральные искажения реликтового фона

Спектральные искажения чернотельного спектра реликтового излучения (РИ) несут информацию о дополнительном энерговыделении из-за возможной новой физики (испарение первичных черных дыр (ПЧД), распад частиц

темной материи и т.д.) на красных смещениях $10^3 < z < 2 \cdot 10^6$. На более ранних z во Вселенной вещество и излучение находятся в состоянии полного ТДР, спектр РИ чисто планковский. На красных смещениях $5 \cdot 10^4 < z < 2 \cdot 10^6$ комптоновские процессы сохраняют число фотонов РИ, что приводит к формированию Бозе-Эйнштейновского спектра с ненулевым химпотенциалом (т.н. μ -искажения: добавление энергии $\Delta\rho$ приводит к $\mu \sim \Delta\rho/\rho$). В стандартной космологической Λ CDM-модели из-за флуктуаций на стадии инфляции ожидается $\mu \sim 2 \times 10^{-8}$. На $z < 5 \cdot 10^4$ спектральные искажения РИ связаны с рассеянием на горячих электронах (эффект Сюняева-Зельдовича) и называются u -искажениями: $u \sim 1.4 \Delta\rho/\rho$. Перспективы поиска спектральных искажений РИ в мм и субмм диапазоне обсуждаются в [3].

2. Физика ядер галактик: сверхмассивные черные дыры и поиск кротовых нор

Наиболее важные результаты получены коллаборацией ЕНТ (Event Horizon Telescope) по построению изображений окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в ядрах галактик М87 [4] и Sgr A* [5]. Перспективы детального изучения окрестностей СМЧД вблизи горизонта событий расширенной коллаборацией ЕНТ (проект ngЕНТ) на частотах 230 и 345 ГГц обсуждаются в [6]. Наблюдения событий приливного разрушения вблизи СМЧД обсуждаются в [7]. Перспективы поиска экзотических кротовых нор в ядрах галактик методами субмм астрономии со сверхвысоким угловым разрешением см. в [2].

3. Галактики на больших красных смещениях

Первые прорывные наблюдения далеких галактик космическим телескопом JWST были получены в 2022 г. [8]. Наиболее интересны для мм и субмм диапазона галактики с высоким темпом звездообразования свыше 100 масс Солнца в год [2], в частности запыленные массивные галактики (т.н. submm galaxies), наблюдаемые ALMA [9]. Проблема эволюции эллиптических и спиральных галактик в контексте современной космологии и эмпирических данных подробно обсуждается в обзоре [10]. Рост СМЧД в ядрах галактик и проверка теории методами мм и субмм астрономии обсуждается в [11]. Исследование межзвездной среды в далеких галактиках обсуждаются в [12].

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Akiyama and e. al., "Millimeter/Submillimeter VLBI with a Next Generation Large Radio Telescope in the Atacama Desert," *Galaxies*, vol. 11, no. 1, p. 1, 2023.

**Международная радиообсерватория на плато Суффа:
перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии**

2. И. Новиков и др., «Задачи научной программы космической обсерватории Миллиметрон и технические возможности её реализации». *УФН*, vol. 404, p. 404, 2021.

3. Kogut A. et al., "CMB Spectral Distortions: Status and Prospects," *ASTRO2020 APC white paper*, no. arXiv:1907.13195, 2019.

4. EHT Collaboration, "First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole," *ApJL*, vol. 875, p. 1, 2019.

5. EHT Collaboration, "First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way," *ApJ Letters*, vol. 930, p. L12, 2022.

6. R. Emami et al., "Tracing the hot spot motion using the next generation Event," arXiv, 2022.

7. B. Curt et al., "Modeling Reconstructed Images of Jets Launched by SANE Super-Eddington Accretion Flows Around SMBHs with the ngEHT," arXiv:2211.15906, 2022.

8. E. Curtis-Lake et al., "Spectroscopy of four metal-poor galaxies beyond redshift ten," arXiv:2212.04568, 2022.

9. J. A. Hodge and E. da Cunha, "High-redshift star formation in the Atacama large millimetre/submillimetre array era," *Royal Society Open Science*, no. 12, p. id.200556, 2020.

10. О. Сильченко, «Эмпирические сценарии эволюции галактик». *УФН*, vol. 192, p. 1313, 2022.

11. M. Volonteri, M. Habouzit and M. Colpi, "The origins of massive black holes," *Nature Reviews Physics*, vol. 3, no. 11, p. 732, 2021.

12. E. Falgarone et al., "Large turbulent reservoirs of cold molecular gas around high-redshift starburst galaxies," *Nature*, vol. 458, no. 7668, p. 430, 2017.

АСТРОНОМИЯ В УЗБЕКИСТАНЕ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

Ш.А. Эгамбердиев

Астрономический институт АН РУз
e-mail: shuhrat@astrin.uz

Астрономические исследования в Узбекистане уходят своими корнями в глубокую древность. Огромный вклад в развитие науки о небе внесли наши великие соотечественники в эпоху средневековой мусульманской астрономии. Имена Ахмада Фергани (Alfraganus), Мухаммада Хорезми (Khwarazmi), Абу Райхана Бируни и, конечно, Улугбека хорошо известны во всем мире [1]. Однако, цель нашего нынешнего доклада дать краткий обзор становления в Узбекистане современной астрономии, а также, того, как традиции, заложенные в прошлом, получают развитие в наше время.

Современная астрономия в Узбекистане начинается с учреждения Ташкентской астрономической обсерватории (ТАО). Началом деятельности ТАО принято считать 1873 г., когда на территории ТАО были выполнены первые астрономические определения времени и широты [2]. На ТАО возлагалась задача создания опорной астрономо-геодезической сети. Полный каталог географических координат 850 населенных пунктов Туркестанского края (куда кроме территории Средней Азии и Казахстана входил и юг России) был опубликован П.К. Залесским в 1914г. [2].

В первые сто лет существования основной тематикой ТАО/АИ являлись проблемы астрометрии: определение изменчивости географических широт, поправок часов, составление фундаментальных и фотографических каталогов звезд, исследование ошибок инструментов и т.д. В 1966г. ТАО была преобразована в Астрономический институт АН РУз [2].

В 1895г. начались работы по созданию фотографической карты неба с помощью Нормального астрографа, приобретенного для международной программы Carte du Ciel. За все годы функционирования на этом астрографе и двойном астрографе Цейсса, установленном в г. Китаб в 1978г. было получено около 15 тысяч фотопластинок. Сегодня фототека ТАО\АИ является одной из богатейших в мире [2,3].

В годы Второй мировой войны, когда астрономические обсерватории европейской части СССР были эвакуированы за Урал, только одна ТАО в 1941 г. на протяжении четырех с половиной месяцев обеспечивала нужды страны и фронта точным временем. До семи раз в сутки сигналы точного времени прямо с территории ТАО передавались в эфир. Ситуация повторилась в 1944 г. когда была осуществлена реэвакуация обсерваций [2].

Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

В 1985 г. АИ вошел в международную гелиосейсмологическую коллаборацию ИРИС, по изучению внутреннего строения Солнца на основе регистрации его пульсаций. Из шести станций сети ИРИС станция Кумбель, расположенная под Ташкентом, обеспечила банк программы ИРИС более чем 40% данных. Это был один из наиболее удачных проектов, выполненных с участием АИ [4].

В результате многолетних астроклиматических поисков в 1960-х годах на территории Узбекистана была найдена гора Майданак, которая оказалось очень благоприятным пунктом для проведения астрономических наблюдений [2,5]. Сегодняшнее и будущее развитие астрономии в Узбекистане связано с Майданакской астрономической обсерваторией (МАО). Благодаря значительному количеству ясного ночного времени (около 2000 часов) и высокому качеству атмосферного изображения (медианное значение 0.69 угловых секунд), а также уникальному географическому положению посреди Евразийского континента, МАО является очень востребованным местом для международных программ, требующих непрерывного мониторинга переменных астрофизических объектов [5]. МАО является одной из базовых станций таких программ как Всемирный блазарный телескоп, мониторинг оптического послесвечения гамма-всплесков, гравитационных линз, сверхновых в близлежащих галактиках и т.д. [6].

В 1993 г. астрономические обсерватории МГУ, ЛГУ, ГАО АН Украины и др. организаций, расположенные на территории МАО, перешли под юрисдикцию Республики Узбекистан. В настоящее время все телескопы поддерживаются дееспособными и используются в рамках двусторонних и многосторонних программ. Так, в настоящее время АИ/МАО входит в коллаборацию GRANDMA по программе исследования оптических проявлений источников гравитационных волн, а также в коллаборацию SVOM по регистрации оптических послесвечений космических гамма-всплесков (<https://grandma.ijclab.in2p3.fr/>).

В результате плодотворной работы сотрудников АИ АН РУз астрономия в Узбекистане выделилась в разряд наиболее успешно развивающихся направлений науки. Согласно данным аналитической службы Международной программы SCOPUS по состоянию развития астрономии Узбекистан занимает 56-е место в мире, опережая все государства Центрально-азиатского региона. В этом большая роль принадлежит работам в области теоретической астрофизики, обзор которых представлен в отдельном докладе.

В 2017г. на первом саммите по науке и технологиям Организации исламского сотрудничества было предложено установить на МАО 4-м адаптивный телескоп и назвать его в честь выдающегося астронома Улугбека. В настоящее время прорабатывается вопрос об установке на МАО такого телескопа [7].

В канун 150-летия создания ТАО следует отметить, что традиции, заложенные нашими великими предшественниками и выдающимися русскими учеными, продолжают и успешно развиваются.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ehgamberdiev Sh. The Ulugh Beg Zij, Collection of Annotations of Ancient Science Books, TARAЕ Publishing (Wool Media Digitech), Korea, pp. 287-318, 2020.
2. В.П. Щеглов, В Сб. Астрономическому институту Академии наук Узбекской ССР 100, Изд-во ФАН, Ташкент, (1974)
3. Ehgamberdiev, Sh. The Development of Astronomy and Emergence Astrophysics in Uzbekistan, in “The Emergence of Astrophysics in Asia: Opening a New Window on the Universe”, Springer International Publishing, pp. 843-859 (2017)
4. Ehgamberdiev, Sh.A., Fossat, E., Serebryanskiy, A.V., Twenty-five years of helioseismology research in Uzbekistan, Journal of Astronomical History and Heritage, 17(1), p. 45-64 (2014)
5. Ehgamberdiev Sh. et al. The astroclimate of Maidanak Observatory in Uzbekistan, Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 145, 293–304 (2000).
6. Ehgamberdiev Sh., Modern astronomy at the Maidanak observatory in Uzbekistan, Nature Astronomy, 2, pp. 349-351 (2018)
7. Ehgamberdiev Sh., Work Together to Revive the Great Traditions of Chinese and Uzbek Astronomy, Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 32(2), p. 87- 92 (2018)

МИЛЛИМЕТРОВАЯ И СУБМИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ В МИРЕ И АКТУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕЖЗВЁЗДНОЙ СРЕДЫ И ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

И.И. Зинченко¹, А.С. Ходжаев², Б.М. Шустов³

¹ Институт прикладной физики РАН

² Астрономический институт АН РУз

³ Институт астрономии РАН

e-mail: zin@ipfran.ru, hojaev@yahoo.com, bshustov@inasan.ru

Аннотация

Пик излучения холодных межзвёздных облаков, в которых рождаются новые звёзды, лежит в субмиллиметровом диапазоне длин волн. Миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны насыщены спектральными линиями атомов и молекул, которые, наряду с излучением пыли, несут информацию о физико-химических условиях в исследуемых объектах. В данной работе обсуждаются актуальные задачи и основные достижения миллиметровой и субмиллиметровой астрономии в исследованиях межзвёздной среды и тел Солнечной системы, а также приводятся сведения о существующих и перспективных инструментах этого диапазона в мире.

Введение

Многие из задач миллиметровой и субмиллиметровой астрономии связаны с изучением «холодной» Вселенной [1]. В основном это плотные межзвёздные газопылевые облака. В них происходит процесс звёздообразования, многие аспекты которого до сих пор не вполне понятны. Пик их излучения лежит в субмиллиметровом диапазоне. Этот диапазон также чрезвычайно насыщен спектральными линиями молекул и атомов. В межзвёздных облаках к настоящему времени найдено более 260 различных молекул, не считая изотопологов. Наблюдения спектральных линий, а также излучения пыли позволяют изучать физические условия и процессы в межзвёздных облаках, а также их химический состав. К настоящему времени в мире построено довольно много радиотелескопов этого диапазона, в том числе несколько антенных решёток. Имеются планы создания новых уникальных инструментов.

Актуальные задачи и основные достижения миллиметровой и субмиллиметровой астрономии в исследованиях межзвёздной среды и тел Солнечной системы

Наблюдения на миллиметровых и субмиллиметровых волнах позволяют изучать сравнительно плотные и холодные области, в которых происходят процессы звёздообразования. Исследования общих характеристик таких областей основаны на обзорах в континууме и в спектральных линиях молекул на волнах от миллиметрового до инфракрасного диапазонов. К настоящему времени выполнено довольно много таких обзоров, результаты которых сейчас активно используются при изучении областей звёздообразования. Исследования таких областей нацелены на выяснение условий образования звёзд разных типов и деталей процесса звёздообразования. Особенно много вопросов пока вызывает процесс образования массивных звёзд. Большой цикл работ по исследованию областей, где образуются такие звёзды, выполнен сотрудниками ИПФ РАН (смотри обзор в работе [2]). Важным достижением последнего времени явилось обнаружение вспышек светимости у некоторых массивных протозвёзд, которые свидетельствуют об эпизодической дисковой аккреции, как механизме накопления массы. Продемонстрирована важная роль межзвёздных волокон в звёздообразовании. Их изучение активно продолжается. Немало работ посвящено стимулированному звёздообразованию в оболочках расширяющихся зон НП. Изучаются и другие триггеры этого процесса – такие, как столкновения облаков. Важным направлением исследований является изучение истории звёздообразования во Вселенной. Наблюдается пик звёздообразования в области красных смещений $z \sim 2$, когда темпы звёздообразования на единицу объема на порядок превышали нынешние. Очень актуальна задача исследования этого процесса и в более ранние эпохи. В последнее время благодаря наблюдениям на интерферометре субмиллиметрового диапазона ALMA удалось получить детальные изображения ряда протопланетных дисков. Более того, было даже зарегистрировано излучение от пылевого диска вокруг экзопланеты. Эти результаты очень важны для понимания процессов формирования планет.

Большие возможности открывают и наблюдения тел Солнечной системы на миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Они важны для исследований солнечной атмосферы и активных процессов на Солнце. Наблюдения спектральных линий молекул позволяют изучать химический состав атмосфер планет и их спутников, а также состав газов, испаряющихся с поверхности комет при их приближении к Солнцу. Среди них обнаружено много сложных органических молекул. Наблюдения с высоким угловым разрешением позволяют изучать движения атмосферных масс, кинематику хвостов комет и пр. Возможны наблюдения крупных астероидов.

Инструменты миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Отдельными странами и консорциумами с участием многих стран в местах с подходящим астроклиматом построены и эффективно эксплуатируются десятки антенн диаметром от ~ 10 до 50 м, работающие как в режиме одиночных радиотелескопов, так и в составе радиоинтерферометров. Большинство из них может объединяться в глобальную сеть под названием «Телескоп горизонта событий» (ЕНТ). Созданы высокочувствительные приемники. Планируется строительство новых крупных радиотелескопов с большим полем зрения (например, AtLAST), что необходимо для обзоров неба и исследований протяженных объектов.

Заключение

Миллиметровая и субмиллиметровая астрономия является важнейшим и часто уникальным источником информации для решения ряда актуальных астрофизических проблем, в том числе в исследованиях межзвёздной среды и тел Солнечной системы. Инструментальная база миллиметровой и субмиллиметровой астрономии в мире активно развивается. Россия и СНГ сильно отстают в этой области. В то же время в РФ есть неплохой задел в проведении научных исследований в этом диапазоне и в разработке приёмной аппаратуры. Создание хотя бы одного достаточно крупного миллиметрового/ субмиллиметрового телескопа позволит значительно повысить уровень проводимых в наших странах астрофизических исследований и включиться в международные проекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зинченко И. И. Современная миллиметровая и субмиллиметровая астрономия // Известия вузов. Радиофизика, 46(8-9), С. 641–659 (2003)
2. Zinchenko I.I. Observational studies of high-mass star formation // Astronomical and Astrophysical Transactions, 33(4) (2022) in press, arXiv:2211.15586

КОСМИЧЕСКАЯ МИЛЛИМЕТРОВАЯ АСТРОНОМИЯ: ОТ РАДИОАСТРОНА К МИЛЛИМЕТРОНУ ЧЕРЕЗ JAMES WEBB TELESCOPE

Н.Н. Колачевский

Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН
e-mail: kolachevsky@lebedev.ru

Аннотация

В докладе представлен краткий исторический экскурс по обсерваториям, которые работали в ИК, дальнем ИК, суб-мм и миллиметровом диапазонах. Обзоры неба сменялись спектральными наблюдениями, ключевыми обсерваториями стали Spitzer, а затем Herschel. Недавно состоялся запуск James Webb Telescope и следующей обсерватория, которая его дополнит, будет Миллиметрон.

Введение

Обсерватория Миллиметрон – один из четырех аппаратов серии Спектр. Целью программы является запуск нескольких обсерваторий, которые смогли бы покрыть практически все области электромагнитного спектра: от радио до рентгена. Первым аппаратом был Спектр-Р – Радиоастрон, в 2019 г. был запущен Спектр-РГ (рентгеновский диапазон), на очереди ультрафиолет (Спектр-УФ) и Спектр-М – Миллиметрон. Идейным вдохновителем двух из четырех «Спектров», а также наземной обсерватории миллиметрового диапазона, расположенной на плато Суффа, еще в 80-х годах прошлого века, стал академик Николай Кардашев.

Раздел 1

Радиоастрон был запущен в 2011 году, стал первым запущенным аппаратом серии Спектр, а также рекордсменом по многим параметрам – самый крупный в мире космический радиотелескоп (диаметр раскрываемой антенны – 10 метров), самый зоркий телескоп – было достигнуто угловое разрешение в десяток микросекунд дуги. Телескоп, который превысил в 2.5 раза гарантийный срок своего функционирования. Радиоастрон смог объединить около 40 крупнейший радиотелескопов по всему миру в единую

Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

сеть, за 7.5 лет работы удалось накопить огромное количество данные, которые сейчас доступны для ученых астрофизиков. Научная программа Радиоастрона состояла из наблюдений нескольких классов объектов: квазаров и активных ядер галактик, пульсаров, галактических и внегалактических источников мазерного излучения. Наблюдения квазаров позволили получить первые в истории радиоастрономии детальные изображения джетов в активных галактиках. Благодаря высокому разрешению интерферометра Радиоастрон в источнике OJ287 были обнаружены несколько узлов в сильно искривленном джете, что подтверждает гипотезу о модели двойной системы сверхмассивных черных дыр.

Исследование пульсаров с помощью Радиоастрона, позволило открыть субструктуру рассеяния радиоволн на межзвездной плазме. Учет данного эффекта, в дальнейшем, сыграл ключевую роль в получении изображений тени сверхмассивных черных дыр телескопом Горизонта событий источника M87 и центра нашей Галактики. Мазерные источники позволили стать Радиоастрону рекорсменом в угловом разрешении. В наблюдениях таких источников было достигнуто угловое разрешение в восемь микросекунд дуги. Это самое высокое разрешение, которое удалось получить за всю историю астрономии. Данные наблюдения позволили определить асимметрию диска, в котором находится источник мазерного излучения.

Раздел 2

Если говорить о субмм и ИК диапазонах, 25 декабря 2021, был запущен долгожданный телескоп James Webb – обсерватория нового поколения, работающая в диапазоне от 0.6 до 28 микрон с диаметром раскрываемой антенны 6.5 м. 12 июля 2022 телескоп James Webb приступил к выполнению научных задач: поиск и наблюдение экзопланет, протопланетные диски, исследование структуры и химического состава протопланетных дисков, поиск воды в Солнечной системе, изучение спутников Юпитера и спутника Сатурна, наблюдение малых тел Солнечной системы. Обсерватории удалось обнаружить две галактики на красных смещения z больше 10. В списке первых результатов – первое изображение экзопланеты на длине волны менее 5 микрон. Обсерватория только начала работать, а закладываемый срок работы в 10–20 лет означает, что впереди мы увидим еще много открытий, сделанных этой обсерваторией.

Следующей крупной космической обсерваторией нового поколения станет – Миллиметрон или Спектр-М с охлаждаемой до 10 К раскрываемой антенной диаметром 10 метров, которая будет проводить наблюдения в диапазоне от 80 микрон до 3 мм. Миллиметрон будет иметь систему пассивного и активного охлаждения, которая позволит охладить антенну до рекордных 10 К, а бортовую научную обсерваторию до 4 К. Обсерватория будет работать в двух режимах: 1) как одиночный телескоп и 2) как плечо на-

земно-космического интерферометра. Специфика научных задач обсерватории Миллиметрон предполагает 80–90% наблюдений проводить в режиме одиночного телескопа и 10–20% наблюдений в режиме интерферометра совместно с наземными телескопами. Миллиметрон будет обладать целым рядом уникальными характеристик. В первую очередь, это самая крупная охлаждаемая антенна в космосе на ближайшие 2–3 десятилетия, два режима работы, а также на борту Миллиметрона будут гетеродинные приемники. Ни одна другая мм/суб-мм космическая миссия не обладала такими приемниками. Научная программа обсерватории Миллиметрон формируется таким образом, чтобы с помощью наблюдений решить несколько ключевых и наиболее актуальных задач в области современной астрофизики:

1) Исследование физики сверхмассивных черных дыр – получение детальных изображения горизонта событий сверхмассивных черных дыр в режиме РСДБ

2) Понимание происхождения Вселенной и эпохи реионизации – наблюдение искажений спектре реликтового излучения, изучение эффект Суняева-Зельдовича

3) Исследование вопросов образования звезд и планет, поиск следов воды.

Заключение

Некоторые из направлений и задач идут бок о бок с научной программой телескопа James Webb. Возможности и научно-технический потенциал обсерватории Миллиметрон ставят её в один ряд с самыми крупными и успешными космическими проектами. Следует ожидать, что после запуска обсерватории, Миллиметрон и James Webb Telescope смогут работать, в своего рода симбиозе, открывая новую эпоху ярких открытий в астрономии.

СИС-ПРИЁМНИК ДИАПАЗОНА 211-275 ГГц ДЛЯ РАДИОАСТРОНОМИИ

В. Кошелец^{1,2}, К. Рудаков¹, А. Худченко^{1,2}, Л. Филиппенко¹

¹Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

²Астро-космический центр, Физический Институт им. П.Н. Лебедева РАН
e-mail: valery@hitech.cplire.ru

Аннотация

Проведен цикл исследований по созданию супергетеродинных СИС приемников субТГц диапазона с квантовой чувствительностью для новых радиоастрономических проектов. Представлены опубликованные результаты по созданию и исследованию приемника диапазона 211–275 ГГц, достигнута шумовая температура менее 25 К в двухполосном режиме, реализована полоса промежуточных частот 4-8 ГГц.

Введение

Сверхпроводниковые наноструктуры обладают высокой характерной частотой и чрезвычайно сильной нелинейностью, что позволяет создавать на их основе системы для приема и генерации терагерцового (ТГц) диапазона с характеристиками, не имеющими аналогов среди приборов, основанных на других принципах [1, 2]. Для реализации предельно достижимых параметров сверхчувствительных приемных устройств с требуются сверхпроводниковых туннельные структуры субмикронных размеров с чрезвычайно высокой плотностью тока (выше 20 кА/см²) и малыми токами утечки, что позволяет создавать интегральные сверхпроводниковые устройства на их основе для работы в ТГц диапазоне с предельной (квантовой) чувствительностью.

Раздел 1

В настоящее время в большинстве приложений используются изготовленные полностью из тугоплавких материалов СИС переходы на основе структуры Nb/AlOx/Nb. Была модернизирована технология изготовления туннельных структур, в нижний электрод был введен дополнительный слой алюминия толщиной 5 нм на расстоянии 50 нм от туннельного барьера. Этот слой не только улучшил морфологию пленки ниобия вблизи барьера, но и существенно изменил функцию распределения электронов в электроде вблизи барьера (см. рис. 1).

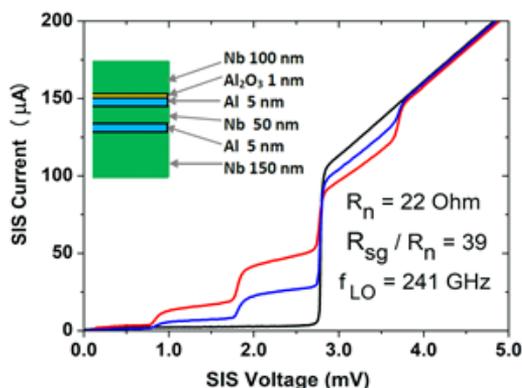


Рис. 1. ВАХ смесительного элемента Nb-Al-Nb/Al-AlOx/Nb, изготовленного на кварцевой подложке (площадь СИС перехода $A = 1 \text{ мкм}^2$, $V_g = 2,8 \text{ мВ}$, $R_{пA} = 22 \text{ Ом мкм}^2$); джозефсоновский сверхток подавляется магнитным полем (черная линия). ВАХи смесителя SIS, накачиваемого гетеродином на частоте 241 ГГц при двух разных мощностях гетеродина, показаны синими и красными линиями. На вставке представлен поперечный разрез структуры

Раздел 2

Для экспериментального измерения отклика приёмного элемента был использован Фурье интерферометр Майкельсона (ФТС). Шумовая температура приемника измерялась методом переключения «холодной» и «горячей» нагрузки. Зависимость двухполосной шумовой температуры СИС-приемника от частоты гетеродина показана на рис. 2; экспериментальные значения приведены без каких-либо коррекций на потери в тракте приемника. Полученные значения шумовой температуры удовлетворяют техническим требованиям к приемнику диапазона 211–275 ГГц для приемного комплекса космического радиотелескопа «Миллиметр».

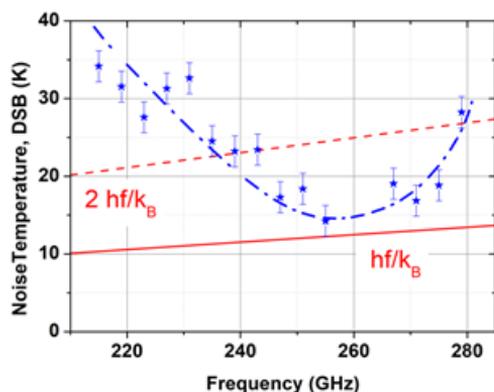


Рис. 2. Шумовая температура СИС приемника, измеренная в двухполосном режиме от частоты гетеродина; экспериментальные данные представлены без поправок на потери во входных оптических элементах. Погрешности измерения показаны вертикальными отрезками, их величина составляет примерно 2 К.

Заключение

Разработана топология сверхпроводниковых туннельных структур для волноводных СИС-смесителей диапазона 211–275 ГГц; проведено численное моделирование характеристик приемных элементов. Отработаны

Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

методы изготовления высококачественных туннельных переходов на подложках из кварца; проведены измерения волноводного смесителя на основе СИС структур. Шумовая температура приемника на частоте 255 ГГц составила 14 К, что лишь немного превышает квантовый предел hf/kB . Разрабатываемые приемники предназначены для новых наземных и космических радиоастрономических проектов, а также Российской космической программы «Миллиметрон». Основные результаты доклада опубликованы в работах [3,4].

ЛИТЕРАТУРА

1. Tucker J. R., Feldman M. J. Quantum detection at millimeter wavelengths // *Reviews of Modern Physics*, 57(4), С. 1055 (1985)
2. P.N. Dmitriev, L.V. Filippenko, and V.P. Koshelets «Applications in Superconducting SIS Mixers and Oscillators: Toward Integrated Receivers», chapter 7 in the book “Josephson Junctions. History, Devices, and Applications”, edited by Edward Wolf, Gerald Arnold, Michael Gurvitch, John Zasadzinski, pp. 185-244. ISBN 978-1-315-36452-0 (eBook), 2017.
3. V. Koshelets, K. Rudakov, A. Khudchenko, L. Filippenko, et al, Superconducting Sub-THz Receivers for Space and Ground-Based Radio Astronomy // *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 48(9),287-291 (2021)
4. Rudakov K.I., Khudchenko A.V., Filippenko L.V., Paramonov M.E., Hesper R., Lima D.A., Baryshev A.M., and Koshelets V.P., THz Range Low-Noise SIS Receivers for Space and Ground-Based Radio Astronomy, *Applied Sciences*, 11, 10087 (2021)

ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ФИЛАМЕНТАЦИИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ В АТМОСФЕРЕ

С.А. Бахрамов¹, А.К. Касимов²

¹Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз,

²Национальный университет Узбекистана

akasimov@nuu.uz

Аннотация

Проведены численные эксперименты влияния распределения интенсивности в поперечном сечении пучка на процесс филаментации ультракороткого лазерного импульса в атмосфере. Выявлена преимущественная стабилизация числа филаментов в эллиптическом пучке.

Распространение мощных фемтосекундных лазерных импульсов в воздухе сопровождается явлением филаментации, при которой существенная часть энергии излучения концентрируется в некоторых точках поперечного сечения импульса, которые со стороны наблюдаются в виде тонких протяженных нитей – филаментов [1,2]. Вследствие пространственной неустойчивости интенсивного светового поля при самофокусировке, импульсы высокой мощности распадаются на множество филаментов, которые хаотически зарождаются и исчезают по мере распространении излучения. Длина филаментации может составлять десятки и сотни метров в зависимости, в первую очередь от мощности излучения, а также от других факторов. Стохастический характер филаментации, обусловленный флуктуациями оптических параметров среды, приводит к нестабильности сигнала обратного рассеяния при зондировании атмосферы. Значительное влияние на формирование филаментов и их расположение в поперечном сечении пучка оказывает пространственное распределение интенсивности в лазерном пучке. В связи с этим весьма актуальным является исследование влияния распределения интенсивности в поперечном сечении пучка на филаментацию мощного фемтосекундного лазерного импульса в турбулентной атмосфере.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования распространения мощного лазерного импульса в турбулентной атмосфере.

**Международная радиообсерватория на плато Суффа:
перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии**

При моделировании, для описания изменений светового поля $E(r; z, t)$, было использовано приближение метода медленно меняющихся амплитуд, в котором пренебрегаем материальной дисперсией. Вместо вклада плазменной нелинейности было введено ограничение на увеличение интенсивности в сечении пучка в уже сформировавшихся филаментах на уровне $I_s = 100 * I_{0 \max}$, где $I_{0 \max}$ – максимальное значение интенсивности в начальной плоскости [2], что позволило значительно сократить время вычислений, а также исследовать распространение пучка за нелинейным фокусом. Таким образом, было исследовано уравнение

$$2ik_0 \left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E = \Delta_{\perp} E + 2k_0^2 \Delta n_{nl}(I) E + 2k_0^2 n_1 E \quad (1)$$

где, $k_0 = 2\pi / \lambda$ – волновое число, λ – длина волны излучения, n_1 – флуктуирующая часть показателя преломления в турбулентной атмосфере, $\Delta n_{nl}(I) = n_2 I_s \arctan(I/I_s)$ – нелинейная добавка к показателю преломления, $n_2 = 5.6 * 10^{-19} \text{ см}^2/\text{Вт}$ – коэффициент оптической нелинейности атмосферы. $I_s \sim 5 * 10^{13} \text{ Вт}/\text{см}^2$ – интенсивность насыщения при ионизации. Флуктуации показателя преломления атмосферы моделировались согласно модели Кармана. Распределение поля в начальной плоскости

$$E(x, y, z = 0) = E_0 \left(\left(-\frac{x^2}{2a} \right) + \left(-\frac{y^2}{2b} \right) \right) \quad (2)$$

где, a и b – есть оси эллипсоида, описывающего поперечное сечение импульса, E_0 – максимальное значение напряженности электрического поля.

$$E_0 = \sqrt{8\pi I_0 / cn} \quad I_0 = P_0 / \pi a \quad (3)$$

При расчетах исследовалась распределение интенсивности в центральном слое, мощность в котором предполагалась $P_0 = 1.2 * 10^{11} \text{ Вт}$.

Исследования проводились для импульсов с распределением поля в поперечном сечении начального импульса для таких соотношений a и b при которых площадь начального пучка оставалась постоянной. Для круглого пучка размер сечения $a = b = 0.9 \text{ см}$. Для исследований был выбран участок пространства с поперечными размерами $2 \times 2 \text{ см}$, в центре которого, находился исследуемый лазерный пучок. Исследуемый участок был разделен сеткой 800×800 , таким образом, величина поперечного шага составляло 25 мкм . Исследования проводились при различных значениях турбулентности атмосферы, ниже представлены результаты экспериментов, со структурной характеристикой показателя преломления $C_n^2 = 5 * 10^{-15} \text{ см}^{-2/3}$. На рис. 1 приведены линии равных интенсивностей в поперечном сечении пучка при одинаковых условиях распространения для круглого и эллиптического пучков. Отношения больших полуосей $a_1 / a_2 = 1.5$.

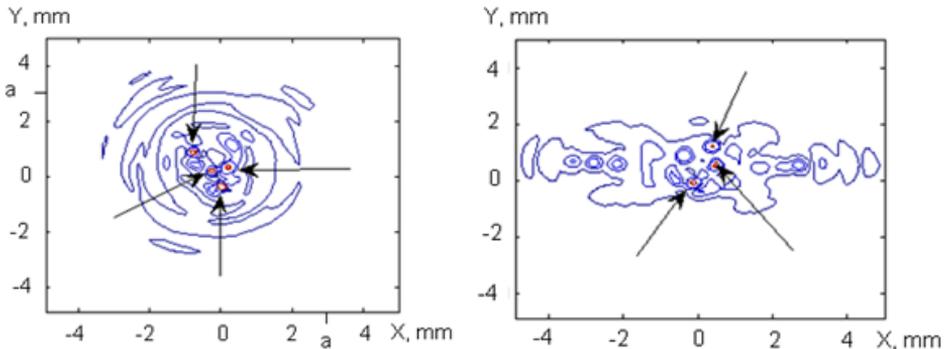


Рис. 1. Линии равной интенсивности в поперечном сечении круглого и эллиптического пучков, при $z = 8.8$ м

Установлено, что число филаментов в поперечном сечении круглого пучка больше, чем в эллиптическом. В тоже время в поперечном сечении пучков на одинаковом расстоянии от начальной плоскости, при распространении по трассе с большей турбулентностью наблюдается большее число филаментов. Установлено, что число филаментов в эллиптическом пучке более стабильно чем в круглом.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. Kasparian, M. Rodrigues, G. Mejean et al.: White-light filaments for atmospheric analysis, *Science* 301, 61 (2003).
2. В.П. Кандидов, С.А. Шленов, О.Г. Косарева, Филаментация мощного фемтосекундного лазерного излучения, *Квантовая электроника*, 30, № 3 (2009).

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СУБТЕРАГЕРЦОВОЙ АСТРОНОМИИ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А.Г. Рудницкий, С.Ф. Лихачев

Астрокосмический Центр Физического института им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук, г. Москва, Россия
e-mail: arud@asc.rssi.ru

Аннотация

В работе рассматриваются перспективные направления в развитии субтерагерцовой астрономии в Российской Федерации. Приводится информация и концептуальные предложения по созданию эффективных инструментов наземного и космического базирования.

Введение

В ближайшие десятилетия астрофизические исследования и развитие соответствующих наблюдательных инструментов будет связано с субтерагерцовым диапазоном частот (от 100 ГГц и выше). В качестве подтверждения стоит привести результаты успешных наблюдений Event Horizon Telescope (ЕНТ) [1, 2]. Активно начинает развиваться наземная сеть телескопов, рождаются новые концепции космических обсерваторий и интерферометров [3, 4]. Частотные возможности наземных телескопов в этом диапазоне серьезно ограничены атмосферой Земли, в то время как угловое разрешение наземного интерферометра ограничено размерами нашей планеты. По этой причине существует необходимость развития одновременно наземных и космических телескопов, способных наблюдать в субтерагерцовом и терагерцовом диапазонах.

Космическая обсерватория «Миллиметрон»

Космическая обсерватория «Миллиметрон» – единственная создаваемая на данный момент в Российской Федерации обсерватория субтерагерцового диапазона. Это будет первый в мире охлаждаемый и раскрываемый космический телескоп, способный проводить наблюдения в диапазоне длин волн от 0.08 до 3 мм. Обсерватория будет обладать раскрываемой и адаптируемой антенной диаметром 10 м [5]. Для достижения требуе-

мых параметров чувствительности, антенна и бортовой комплекс научной аппаратуры будет иметь активную систему охлаждения: приборов (до 4 К) и антенны (до 10 К). «Миллиметрон» будет выведен на орбиту в окрестностях точки Лагранжа L2 системы «Солнце-Земля» (1.5 млн км от Земли). Обсерватория сможет проводить наблюдения в двух режимах: в режиме наземно-космического интерферометра совместно с наземными телескопами субтерагерцового диапазона (КРСДБ, длины волн 0.8–3 мм), в режиме одиночного телескопа (длины волн: 0.08–3 мм). «Миллиметрон» будет иметь шесть основных научных направлений с наиболее актуальными научными задачами субтерагерцового диапазона: релятивистская астрофизика и режим КРСДБ, космология, компактные затемненные ядра галактик, поиск воды, филаментарная структура и магнитное поле, Солнечная система [6–9].

Концепция развития наземных инструментов

На сегодняшний день в Российской Федерации отсутствуют наземные инструменты, которые могли бы эффективно работать на частотах выше 100 ГГц. Тем не менее, существуют концепции и пути развития этого направления. К примеру, для осуществления приема с борта космического аппарата научной информации обсерватории «Миллиметрон», рассматривается вариант модернизации антенны РТ-22 в Пушино (ПРАО АКЦ ФИАН) с увеличением диаметра главного зеркала до 32 м. Усовершенствование антенны предполагается организовать так, чтобы не только осуществлять прием научной информации, но и иметь возможность проводить научные наблюдения на длинах волн до 7–8 мм. Стоит выделить площадку Международной радиоастрономической обсерватории «Суффа» (МРАО «Суффа»), как одну из перспективных. Строительство телескопа субтерагерцового диапазона на плато Суффа сможет стать важным дополнением в качестве наземной поддержки обсерватории «Миллиметрон», а также соединить связку телескопов из состава восточноазиатской РСДБ сети с антеннами западной РСДБ сети ЕНТ [10]. Предлагается одновременно с доработкой проекта радиотелескопа РТ-70 рассмотреть строительство и размещение антенн диаметром до 20 м или несколько компактных массивов антенн малого диаметра субтерагерцового диапазона (5–10 антенн в одном массиве, каждая диаметром от 3 до 10 м). Размещение стоит осуществлять в первую очередь на территории Российской Федерации для отработки технологий на начальном этапе. Концепция массива антенн малого диаметра субтерагерцового диапазона наземного базирования в этом случае будет иметь ряд преимуществ: подвижные антенные модули, позволяющие изменять конфигурацию баз массива, возможность смены наблюдательной площадки, автоматизированное управление.

Космическая интерферометрия субтерагерцового диапазона

Для наблюдений на более высоких частотах (от 345 ГГц) свою актуальность приобретают перспективные направления в области космической терагерцовой астрономии. Предлагаются следующие концепции, представляющие интерес: массив антенн малого диаметра терагерцового диапазона, располагаемый на поверхности Луны и интерферометр «космос-космос» – система из орбитальных спутников-телескопов терагерцового диапазона, работающих в режиме КРСДБ. Массив антенн терагерцового диапазона, располагаемый на поверхности Луны, позволит в условиях отсутствия земной атмосферы проводить эффективные и длительные наблюдения на частотах выше 345 ГГц. В то же время, в отличие от такого массива антенн, интерферометр «космос–космос» позволит решать задачи детального наблюдения близких окрестности сверхмассивных черных дыр (СМЧД) в динамике. Подходящим объектом в последнем случае является СМЧД в центре нашей Галактики – Sgr A*. В обоих случаях, для реализации подобных проектов имеется задел, созданный в рамках разработки обсерватории «Миллиметрон».

Заключение

Субтерагерцовая астрономия в ближайшие десятилетия будет самым развивающимся, востребованным и перспективным направлением в современной астрономии. На данный момент в Российской Федерации единственной создаваемой обсерваторией субтерагерцового диапазона является проект космической обсерватории «Миллиметрон». Обсерватория активно разрабатывается в рамках реализации Федеральной космической программы. На основе вышеизложенного, предлагаются следующие перспективные направления развития субтерагерцовой астрономии в Российской Федерации: создание наземной сети из массивов антенн субтерагерцового диапазона на территории Российской Федерации и создание новых космических проектов субтерагерцового диапазона. В этом ключе площадка МРАО «Суффа» сможет сыграть одну из ключевых ролей. Что касается космических проектов, в первую очередь речь идет о гибридных интерферометрах: компактный массив антенн малого диаметра терагерцового диапазона на поверхности Луны, а также интерферометра «космос-космос» – системы из двух и более космических спутников-телескопов, способных наблюдать в терагерцовом диапазоне в режиме КРСДБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Event Horizon Telescope Collaboration et al. «First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole» // *Astrophysical Journal Letters*, 875, 1, L1 (2019). DOI: <http://doi.org/10.3847/2041-8213/ab0ec7>.

2. Event Horizon Telescope Collaboration et al. «First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way» // *The Astrophysical Journal Letters*, 930, 2, L12 (2022). DOI: 10.3847/2041-8213/ac6674.

3. Leonid I. Gurvits et al. «The science case and challenges of space-borne sub-millimeter interferometry» // *Acta Astronautica* 196, 314–333 (2022) DOI: 10.1016/j.actaastro.2022.04.020.

4. Volodymyr Kudriashov et al. «System design progress in the event horizon imaging using the concept of space-to-space VLBI from medium Earth orbits» // 42nd COSPAR Scientific Assembly, 42, E1.8-17-18 (2018)

5. Evgeny S. Golubev et al. «Primary mirror panels of the Millimetron Space Observatory». B: *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation IV*. Edited: Ramon Navarro and Roland Geyl. Vol. 11451. International Society for Optics и Photonics. SPIE, 114510K, 2020. DOI: 10.1117/12.2562838. DOI: 10.1117/12.2562838.

6. N.S. Kardashev et al. «Review of scientific topics for the Millimetron space observatory». // *Physics Uspekhi* 57, 12, 1199–1228, 2014. DOI:10.3367/UFNe.0184.201412c.1319.

7. I.D. Novikov et al. «Objectives of the Millimetron Space Observatory science program and technical capabilities of its realization» // *Physics Uspekhi* 64, 4, 386–419, 2021. DOI: 10.3367/UFNe.2020.12.038898.

8. A.S. Andrianov et al. «Simulations of M87 and Sgr A* imaging with the Millimetron Space Observatory on near-Earth orbits» // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 500, 4, 4866–4877, 2021. DOI: 10.1093/mnras/staa2709.

9. S.F. Likhachev et al. «High-resolution imaging of a black hole shadow with Millimetron orbit around Lagrange point L2» // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 511, 1, 668–682, 2022. DOI: 10.1093/mnras/stac079.

10. Alexander W. Raymond et al. «Evaluation of New Submillimeter VLBI Sites for the Event Horizon Telescope» // *The Astrophysical Journal Supplement* 253, 1, 5, 2021. DOI: 10.3847/1538-3881/abc3c3.

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ, НОРМАТИВНАЯ БАЗА И ПРАКТИКА СОЗДАНИЯ СУБТГЦ ОБСЕРВАТОРИЙ

В.Ф Вдовин, И.В. Леснов

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород
e-mail: vdovin@ipfran.ru

Аннотация

Представлен обзор проблем электромагнитной совместимости (ЭМС) и методов их предотвращения или парирования в работе радиообсерваторий субтерагерцового (субТГц) диапазона частот. Продемонстрирована серьезность возможных проблем и возможности их решения. Проблемы связаны с работающими в их окрестностях промышленными и бытовыми устройствами и системами, излучающими электромагнитные волны в широком диапазоне частот. Представлен набор методов решения проблем, принятый на практике, опыт нормативно – правового регулирования и технические решения, парирующие негативное воздействием помех, когда избежать их totally не удастся.

Введение

Создание обсерваторий для субТГц радиоастрономических исследований, оснащенных сверхвысокочувствительными приемниками, сталкивается с проблемами электромагнитной совместимости (ЭМС) с работающими в их окрестностях промышленными и бытовыми устройствами и системами, излучающими электромагнитные волны в широком диапазоне частот. В докладе представлен обзор имеющегося набора возможных проблем, принятый на практике опыт нормативно – правового регулирования и технические решения, парирующие негативное воздействием помех, когда избежать их totally не удастся.

1. Перечень возможных проблем ЭМС субТГц обсерваторий

Казалось бы, обсерватории, работающие в столь далеком от широкого промышленного и бытового освоения диапазоне как субТГц, лежащий

от 0.1 до 1.0 ТГц, не должны испытывать проблем, которые на сегодня практически парализовали возможности сверхвысокочувствительного приема сверхслабых радиоастрономических сигналов в дециметровых и сантиметровых волнах. Однако это не так уже сегодня, а в ближайшей перспективе, когда системы связи 5 G подойдут к назначенным для них пределу (мм диапазон волн) и начнется освоение технологий 6G и последующих поколений, они в точности попадут в субТГц диапазон и будут оказывать самое существенное влияние на входные элементы сверхвысокочувствительных трактов радиоастрономических приемников. Однако и сейчас системы связи 4G и 5G технологий, работающие в ДМ и СМ диапазонах, могут создавать недопустимый фон на субТГц приемники уже не на уровне входных элементов, а на каскадах промежуточной частоты (для гетеродинных приемников), или систем контроля и питания (для матриц прямых детекторов).

2. Нормативное регулирование ЭМС на площадках обсерваторий

Существуют различные уровни регулирования проблем ЭМС: Глобальное – ИТУ. ИТУ-R Recommendation 314-8 – рекомендация по выбору частот для наблюдений, линий и тд. ИТУ-R Recommendation 769-2 – Критерии защиты, используемые для радиоастрономических измерений ИТУ-R RA.1272 – выше 60 ГГц. По этой рекомендации управлению подлежат все частоты выше 60 ГГц, а не только выделенные для радиоастрономии. Однако, возможно совместное использование частот, в том числе небольшого числа наземных устройств из-за большого затухания в атмосфере, но защищённых ландшафтом. На текущий момент ситуация с измерениями выше 60 ГГц с точки зрения интерференции не критичная т.к. мало коммерческих потребительских устройств, но продвижения в электронике есть и ситуация может кардинально поменяться. Региональное – в ряде макрорегионов применяются собственные особенности регулирования, базирующиеся на международных нормах, дополненное и распространенное на группу стран (Европейское сообщество, Скандинавия и т.п.) Национальное – существуют и национальные особенности регулирования, к примеру, в России, основываясь на международной нормативной базе IEEE, функционирует Главный радиочастотный центр с обширной региональной сетью и обеспечивает нормативное регулирование и контроль. Локальное. Элементами локального регулирования являются правила ведения хозяйственной и иной деятельности в окрестностях объектов чувствительной инфраструктуры, к которой несомненно относятся обсерватории. В частности, касательно территории Суффы, действуют межправительственные обязательства, записанные в документах.

3. Типы источников ЭМИ

Преднамеренные – те что излучают только в заявленном диапазоне. Случайные – не проектировались чтобы излучать, но излучает. Свечи зажигания. Не преднамеренные – проектировались чтобы использовать электрические сигналы внутри себя без передачи во вне (например, компьютер).
Расположение источников: Наземные, Искусственные спутники земли.

4. Практики существующих обсерваторий

4.1. Western Australia, the Murchison Radio-astronomy Observatory (MRO).
Внутренняя зона молчания 70 км – всё запрещено, внешняя зона 70-150 км,
Зона согласования 260 км

4.2. United States National Radio Quiet Zone. Эта обсерватория стала широко разрекламированным образцом свободной от электромагнитных излучений зоной, с тотальным запретом на излучение ЭИМ в окрестности 5 км, ставшей в последние годы местом паломничества людей, причисляющих себя к категории гиперчувствительных к ЭМИ лиц. Паломничество воплотилось в строительство поселка электромагнитно-зависимых лиц в окрестности обсерватории. Требования к широкополосным передатчикам: снижение мощности, использование узконаправленных антенн. Выделяются две зоны: 16 км зона. Запрещены все широкополосные всенаправленные и мощные передачи. Разрешены: частоты экстренных служб (полиция, пожарные, скорая помощь). 32 км зона. Ограничение и отслеживание источников, неисправного оборудования. Штраф от FCC. Исключения принимаются на индивидуальной основе и связаны с общественной безопасностью. Необходимо оборудование/служба для отслеживания наличия излучателей. 16-ти километровая зона в свою очередь подразделяется на несколько подзон: 1 зона – всё запрещено в частности двигатели внутреннего сгорания, свечи зажигания. Разрешены только дизельные двигатели. 2 зона – тоже самое, но допускаются посетители. Отдельные здания в зоне 1. Запрещён wifi, телефоны, цифровые фотокамеры, СВЧ-печи. 3 зона (до 3.2 км) и 4 (до 16 км) источники идентифицируются и документируются. К нарушителям выезжает комиссия для устранения помех.

4.3. Jodrell Bank Consultation Zone До 1 км полный запрет. До 10 км – «Consultation Zone» решение определяется по ситуации – насколько источник излучения необходим. Директора обсерватории обязаны уведомить. Права вето нет, но комиссия по планированию/застройке учитывает мнение директора обсерватории.

4.4. Itapetinga Radio Observatory 2 км вокруг – зона молчания. Частоты до 50 ГГц

4.5. Metsahovy Observatory. Тотальный запрет использования мобильной связи и WiFi на прилегающей к куполу обсерватории территории в радиусе

1 км. Запрет дополнен выбором места расположения обсерватории – лесной хутор в 45 км от Хельсинки с ближайшими хуторами не ближе 2–3 км от территории Обсерватории.

4.6. Pico Veletta Observatory. Обсерватория IRAM на горе Пико Велетта является лучшей по качеству субТГц обсерваторией в Европе. Учитывая удаленность высокогорной площадки от Гранады и иных населенных пунктов большой ЭМИ нагрузки там не было и нет. Однако, в последние годы склон стал популярен для горнолыжников зимой и горных байкеров летом. Это привело к развитию сети мобильной связи, на которую по сути ограничений в окрестности не наложено. Но здесь и на других обсерваториях отрабатываются и внедряются технические меры, парирующие возможное негативное влияние источников ЭИМ на работу приемных систем обсерватории. Но мирное сосуществование обсерватории с горнолыжным курортом приносит и заметные плюсы с точки зрения расходов обсерватории на создание и поддержку транспортной и иной инфраструктуры обеспечения жизнедеятельности обсерватории.

4.7. ALMA Самая известная в мире субТГц обсерватория ALMA в нагорье Атакама в Чили по своей удаленности от следов цивилизации в виде фонового ЭМИ, может конкурировать с абсолютным чемпионом SPO – обсерватории на южном полюсе. И вместе с тем имеются определенные ограничения. Серьезным послаблением в политике защиты от ЭМИ стала открытая политика обсерватории в области просветительства и научного туризма. Обширная программа этой деятельности описана на сайте обсерватории. И здесь же реализовано довольно много технических решений по защите приемников от паразитных излучений. В частности, режим работы радиотелескопа в интерферометре позволяет отсеять влияние помех, сформированных в окрестности одного из элементов сети (а это имеет место для интерферометра ЕНТ и других сетей), просто цифровой обработкой. Правда следует понимать, что это действие просто ведет к исключению части полезного принятого сигнала и если нагрузка паразитных ЭМИ высока, то исключенной может оказаться значимая часть принятого сигнала, что эквивалентно снижению площади этого телескопа.

4.8. Суффа. Как было отмечено выше, строящаяся международная обсерватория Суффа имеет определенную организационно-правовую защиту от развития негативных сценариев по нарастанию ЭМИ фона в ее окрестностях, зафиксированную в Межправпротоколе. Дополнительным фактором в этом поле изначально было слабая освоенность территории, расположенной в приграничье Таджикистана и Узбекистана. Однако в последнее время по информации в СМИ на площадке Суффы развернуто масштабное строительство горнолыжного курорта, вселяющее большие опасения касательно ЭМИ обстановки. Здесь крайне важно тщательно отрегулировать ограничения и регламенты на ранней стадии. Это значимое обременение для курорта и его владельцев. Но и польза от такого соседства, как показывает опыт, возможна в части инфраструктурного освоения площадки.

Заключение

Представленный обзор проблем и методов их предотвращения или парирования продемонстрировали серьезность возможных проблем, но и возможности их решения.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гос. задания ИПФ 0030-2021-0005

ЛИТЕРАТУРА

1. H.E. Schwarz, Light Pollution, Kluwer Academic, 2003, p. 303.
2. J.E. Casto, "NRAO Vehicle Fleet," The State Journal, 31 October 2016.
3. C. Bucktin, "Telescope Town can hear to within second of the Big Bang but won't let locals use mobiles," Mirror, 31 October 2016.

ФЕМТОСЕКУНДНЫЕ ФИЛАМЕНТЫ КАК НОВЫЙ ТИП ОПОРНЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИСТОЧНИКОВ ДЛЯ АСТРОНОМИЧЕСКОЙ АДАПТИВНОЙ ОПТИКИ

О.Г. Косарева, Н.А. Панов, А.П. Шкуринов

МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет,
Ленинские горы, д.1, стр.2,
119991, Москва, Российская Федерация

Образование искусственных опорных источников (искусственных звезд) при филаментации мощных фемтосекундных лазерных импульсов в атмосфере на высотах более 10 км возможно при распространении пучка радиусом более 5 см, критическая мощность которого превышает критическую мощность самофокусировки на вертикальной трассе в три и более раз. При этом эффективно использовать импульс с наиболее короткой длиной волны, превышающей 300 нм, поскольку с этого значения прозрачность атмосферы резко падает за счет поглощения ультрафиолетового излучения озоном O_3 .

В связи с этим представляют интерес филаменты импульсов второй гармоники (400 нм) излучения титан-сапфирового лазера, эффективность преобразования в которую может достигать десятков процентов [1, 2]. Вырожденное четырехволновое смешение первой и второй гармоники (800 + 400 нм) приводит к генерации широкополосного когерентного терагерцового излучения, которое в сухом воздухе, а также на длинах волн, соответствующих окнам прозрачности поглощения водяными парами, может распространяться на существенные расстояния [3].

Кроме того, следует ожидать ярких опорных источников при филаментации фемтосекундных импульсов на длине волны 351 нм. Для генерации такого излучения можно использовать третью гармонику фемтосекундного лазера с задающим генератором на основе иттербиевого волоконного лазера с центральной длиной волны 1040–1060 нм [4], в дальнейшем усиливаемую эксимерной системой на XeF, аналогично схеме [5].

Методом численного моделирования авторам удалось получить зависимость расстояния самофокусировки на вертикальной трассе от пиковой мощности фемтосекундного импульса P_0 в условиях атмосферной турбулентности на вертикальной трассе высотой до 6 км над уровнем моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордиенко В.М., Гречин С.С., Иванов А.А., Подшивалов А.А., Квант. электроника, 35, 525 (2005)
2. Begishev I.A., Kalashnikov M., Karpov V., Nickles P., Schonagel H. JOSA B, 21, 318 (2004)
3. X.C. Zhang, A. Shkurinov, and Y. Zhang, Nat. Photonics 11, 16 (2017)
4. Chong A., Renninger W.H., Wise F.W. JOSA B 25, 140 (2008)
5. Ахманов С.А., Гордиенко В.М., Джиджоев М.С., Краюшкин С.В., Платоненко В.Т., Попов В.К. Квант. электроника, 13, 1957 (1986)

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ АСТРОФИЗИКА В УЗБЕКИСТАНЕ

Б.Ж. Ахмедов

Астрономический институт Улугбека, Ташкент 100052, Узбекистан
ahmedov@astrin.uz

Развитие релятивистской астрофизики в Узбекистане началось в 1960-х годах с работ профессора Николая Всеволодовича Мицкевича в Самаркандском государственном университете и профессора Леннура Арифова в Институте ядерной физики Академии наук Узбекистана. Кафедра теоретической физики Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека была создана в 1935 году и с 1935 по 1941 год возглавлялась профессором А.Е. Левашовым, специалистом в области общей теории относительности и гравитации. Основная исследовательская группа по релятивистской астрофизике в Узбекистане в настоящее время базируется в Астрономическом институте Улугбека Академии наук Узбекистана.

В последние десятилетия значительные прорывные открытия в релятивистской астрофизике значительно расширили наше понимание релятивистских астрофизических объектов и наблюдательной космологии, а также физики компактных объектов и точных измерений гравитации. В результате такого быстрого прогресса в этой области релятивистская астрофизика и космология стали актуальными, привлекательными и важными областями исследований во всем мире, и это также верно для Центральной Азии.

В Узбекистане основные направления исследований сосредоточены на использовании принципов общей теории относительности (ОТО) и альтернативных теорий гравитации для решения современных проблем в области релятивистской астрофизики. Эти исследования направлены на разработку новых астрофизических приложений и включают исследования в области релятивистской астрофизики, электромагнитных и скалярных полей, гравитационных волн, а также использование спутников для исследований ионосферы и систем позиционирования. В обзорном докладе кратко излагается текущее состояние прогресса, достигнутого в области релятивистской астрофизики в Узбекистане за последние несколько лет (подробнее см. [1,2]).

Магнетары и радиопульсары, также известные как намагниченные нейтронные звезды, представляют собой компактные звезды с чрезвычайно сильными гравитационными и электромагнитными полями. Эти звезды играют важную роль в качестве астрофизической лаборатории для про-

Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

верки теорий гравитации, особенно в режиме сильного поля. Они связаны с одним из основных направлений исследований в группе теоретической астрофизики в Ташкенте.

Кроме того, члены группы изучили свободную от силы плазменную магнитосферу колеблющихся и вращающихся намагниченных нейтронных звезд, включая модель, которая объясняет феноменологию повторяющихся пульсаров в терминах звездных колебаний, которые могут периодически возбуждаться сбоями в звезде. Мы также изучили условия, приводящие к радиоизлучению в магнетарах, уделив особое внимание процессам, которые определяют громкость или бесшумность радиосигналов магнетаров. Текущие наблюдения показывают тесную взаимосвязь между активностью вспышек в магнетарах и генерацией радиоизлучения в их магнитосфере.

Черные дыры (ЧД) были захватывающей областью изучения в астрофизике на протяжении десятилетий из-за их уникальных свойств как релятивистских объектов, не имеющих ньютоновских эквивалентов. Понимание свойств BHS требует передовых математических инструментов и методов для работы с физикой искривленной геометрии в их окрестностях. Изучение BHS, как изолированных, так и бинарных, является сложной задачей и было основным направлением исследований в Узбекистане в последние годы.

Изучение физики ЧД, особенно близких двойных систем ЧД, приобрело огромный интерес, поскольку эти объекты считаются лучшими кандидатами для обнаружения гравитационных волн от остатков слияний. Когда две ЧД в двойной системе сливаются, они излучают большое количество энергии в виде гравитационных волн. Эти волны испускаются за очень короткое время, что делает BHS самыми яркими объектами во Вселенной. С быстрым прогрессом в этой области поиск возможных электромагнитных аналогов этим событиям стал решающим для понимания наблюдений. Обнаружение электромагнитных сигналов от слияний двойных Черных дыр не только имеет важное значение для понимания эволюции двойных черных дыр, но и предлагает новые идеи, которые могут помочь правильно интерпретировать сигналы гравитационных волн.

Группа релятивистской астрофизики в Ташкенте имеет опыт изучения различных астрофизических процессов с использованием структуры искривленного пространства-времени и применения численных и аналитических методов для решения дифференциальных уравнений. Члены группы сосредоточились на понимании наблюдательных свойств релятивистских звезд и ЧД, включая их оптические, энергетические и электромагнитные характеристики.

Группа предложила формализм для изучения влияния чрезвычайно искривленной геометрии пространства-времени на свойства как электромагнитных полей внутри, так и снаружи намагниченных релятивистских звезд и ЧД.

При участии нашей группы была разработана более общая процедура для иллюстрации тени ЧД в виде произвольной полярной кривой, выраженной в терминах разложения Лежандра. Разработанный формализм обеспечивает точное описание зашумленных радиоинтерферометрических данных наблюдений с минимальной погрешностью дисперсии по сравнению с предыдущими мерами искажения. Группа также тщательно изучила гравитационное линзирование, создаваемое компактными астрофизическими объектами.

Многочисленные (более 20) успешные защиты кандидатских и докторских диссертаций в последние годы по теоретической астрофизике демонстрируют быстрый рост и многообещающее будущее релятивистской астрофизики в Узбекистане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ahmedov B., Relativistic Astrophysics in Uzbekistan, Proceedings of the International Astronomical Union V. 13, Symposium S349: Under One Sky: The IAU Centenary Symposium, pp. 276–282. (2019)
2. Ahmedov B., Development and perspectives of relativistic astrophysics in Uzbekistan. Arab. J. Math. 11 , pages 141–153 (2022) <https://doi.org/10.1007/s40065-022-00363-3>

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ МЕЖДУНАРОДНОЙ РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ НА ПЛАТО СУФФА

Г.И. Шанин

Радиоастрономическая обсерватория РТ-70 АН РУз
suffa.observatory@gmail.com

Аннотация

В сообщении приводятся основание и место строительства Международной радиоастрономической обсерватории «Суффа» (МРАО «Суффа»), её научная и практическая значимость, краткая история создания и перечень решений первостепенных задач в целях завершения строительства и введение МРАО «Суффа» в эксплуатацию.

Введение

В Узбекистане в районе горного массива Туркестанского хребта – плато Суффа, высота 2500 – 3000 м над уровнем моря, в настоящее время вступило в завершающую фазу строительство уникального научного объекта – радиоастрономического комплекса РТ-70.

Радиоастрономический комплекс создается в соответствии с Соглашением между Правительством Республики Узбекистан и Правительством Российской Федерации о создании Международной радиоастрономической обсерватории на плато Суффа (МРАО «Суффа») от 27.07.1995 г.

Создание радиоастрономического комплекса имеет цель обеспечить высокий уровень фундаментальных исследований дальнего и ближнего космоса, а также решение ряда прикладных задач на совершенно новом уровне.

Главным инструментом строящегося комплекса является прецизионный полноповоротный радиотелескоп РТ-70 нового поколения с адаптивной системой управления качеством отражающей поверхности антенны диаметром 70 метров и работающим в коротковолновой области спектра миллиметрового диапазона длин волн.

Раздел I

Одним из главных требований эффективной работы радиотелескопа РТ-70, особенно в режиме совместных (одновременных) с радиотелескопами космического базирования исследованиях космических объектов (режим радиоинтерферометра со сверхдлинной базой ~ 300 тыс.км), является отсутствие радиопомех и предсказуемость состояния земной атмосферы. С этой целью место для установки радиотелескопа РТ-70 было выбрано высоко в горах, а на плато Суффа для построения прогностической модели атмосферы этого района, в режиме круглосуточного мониторинга, проводятся комплексные научные исследования, включая метеорологические, оптические и радиофизические измерения параметров земной атмосферы.

Научная и практическая значимость строящегося комплекса на плато Суффа были предметом глубокого обсуждения на международных рабочих совещаниях – в Ташкенте в августе 2018 года и в Самарканде в декабре 2022 года, на которых обращалось внимание на важную роль создаваемого радиотелескопа РТ-70 для мировой науки как на современном этапе, так и для перспективных радиоастрономических исследований в миллиметровой области спектра, по широкому классу фундаментальных задач.

Строительство радиоастрономического комплекса на плато Суффа и городской базы в поселке Заамин было начато в 1982 году. В состав комплекса на начальном этапе реализации проекта входили радиотелескоп РТ-70, монтажно-испытательный корпус, помещения управления РТ-70, здание для дирекции и лабораторий для научных сотрудников, производственный корпус, система энерго и водоснабжения, жилые и складские помещения в поселке Заамин. Строительство велось в соответствии с утвержденной проектно-сметной документацией, полным финансовым обеспечением и соблюдением сроков исполнения.

В 1992 году строительно-монтажные работы на плато Суффа были остановлены. Степень готовности основных объектов комплекса к этому времени составляла ~ 60%, а монтажные работы на радиотелескопе РТ-70 ещё какое-то время продолжались.

Как было отмечено выше, в 1995 году было подписано Межправительственное Соглашение. Стороны активизировали совместные усилия по корректировке проекта комплекса сооружений на плато Суффа и в поселке Заамин включая проведение подготовительных работ, решение организационных вопросов и необходимого для этих целей финансирования.

Обязательства Сторон:

Российская Федерация – изготовление, в соответствии с проектной документацией, специального оборудования радиотелескопа РТ-70. Изготовление и установка на плато Суффа комплекса радиоизмерительной аппаратуры миллиметрового диапазона для исследования радиопрозрачности земной атмосферы.

Международная радиообсерватория на плато Суффа: перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии

Республика Узбекистан – в соответствии с проектно-сметной документацией строительство на плато Суффа водопровода, электроподстанции 110/10кВ, ремонт лабораторного и производственного корпусов, гостиницы в поселке Заамин, круглосуточный мониторинг состояния земной атмосферы.

Исполнение Сторонами этих обязательств, а также разработка и согласование проекта Межправительственного Протокола о внесении дополнений и изменений в Соглашение (далее Протокол), утверждение Устава МРАО «Суффа» и её государственная регистрация были предметом обсуждения во время визита в Ташкент (октябрь 2018г.) Президента Российской Федерации В.В. Путина. После обсуждения президентами Академии наук Узбекистана и России 19 октября 2018 г. был подписан План действий (Дорожная карта) по созданию МРАО «Суффа». Дорожная карта утверждена Постановлением Президента Республики Узбекистан № 3997 от 3 ноября 2018г.

В соответствии с Дорожной картой 19 ноября 2021 года в г. Москве был подписан Протокол о внесении изменений в Соглашение и Устав Международной радиоастрономической обсерватории «Суффа», которые, в рамках внутригосударственных процедур, Постановлением Президента Республики Узбекистан Мирзиёевым Ш.М. № ПП-293 от 24 июня 2022 года были утверждены и вступили в силу. Практическое исполнение этих документов подробно прописано Поручением (п.12.5) двадцать третьего заседания Межправительственной комиссии по экономическому сотрудничеству между Республикой Узбекистан и Российской Федерацией от 23 октября 2022 года.

Заключение

В настоящее время в целях своевременного и качественного исполнения перечисленных выше поручений Правительственных органов Сторон и рекомендаций научного сообщества необходимо решить следующие первоочередные задачи:

1. Назначение Полномочных представителей Правительств Сторон и их заместителей в Высший орган МРАО «Суффа» – Комитет полномочных представителей (далее – Комитет). Функции Комитета достаточно подробно приведены в статье 5 и 10 Соглашения, из которых следует, что реализация задач поставленных Правительствами Сторон без компетентного и ответственного участия Комитета невозможна.

2. Выделение в соответствии со ст.10,11 Соглашения в г. Ташкенте и в г. Москве отдельного помещения (здания) для размещения Дирекции МРАО «Суффа», научных отделов, лабораторий, служб хозяйственного и автотранспортного обеспечения.

3. Проведение государственной регистрации научно-исследовательской организации «Международная радиоастрономическая обсерватория «Суффа»; обладающей правами юридического лица, международной правосубъектностью и открытой для присоединения других государств.

4. Оформление Государственного Акта землепользования на участок земли на плато Суффа, ранее выделенного в порядке, установленном законодательством и Соглашением (Ст.3,10,13), для строительства инфраструктурных объектов МРАО «Суффа».

5. Проведение на плато Суффа специалистами Сторон исследований на предмет возможных радиопомех от строящегося вблизи радиотелескопа РТ-70 туристического комплекса.

ВЛИЯНИЕ КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ НА КОСМИЧЕСКУЮ ПОГОДУ

З.Д. Миртошев

Самаркандский государственный университет
zmirtoshev@gmail.com

Аннотация

С помощью *in situ* измерений и нейтронных мониторов исследованы последствия влияния корональных выбросов массы (КВМ) на космическую погоду и проявления взаимодействий типа КВМ-КВМ в межпланетном, околоземном космическом пространстве и на Земле, определены их геоэффективные физические параметры. Работа посвящена проблеме взаимодействий типа КВМ-КВМ, их идентификации, и геомагнитным последствиям взаимодействующих КВМ.

Введение

Эруптивные явления на Солнце приводят к возникновению опасных явлений космической погоды, которые могут оказать серьёзное воздействие на космические и наземные технологические системы, а также на жизнь и здоровье людей. КВМ, гигантские облака намагниченной плазмы, которые обычно извергаются с Солнца, являются основной причиной возмущений космической погоды, регулярность которых, в свою очередь, зависит от цикла солнечной активности. Когда такой выброс распространяется к Земле, оно может вызывать сильные геомагнитные бури, а также может модулировать интенсивность галактических космических лучей, наблюдаемых на Земле. Таким образом, последствия космической погоды играют фундаментальную роль в качестве фактора околоземной космической среды и могут быть ещё более опасными, если столкновения с Землей связаны с взаимодействиями типа КВМ-КВМ, происходящими в межпланетном пространстве между Солнцем и Землей. Следовательно, крайне важно изучить околоземные свойства КВМ, их межпланетную эволюцию, а также *in situ* измерения (прямые измерения на месте), чтобы понять связанные с этим явлением последствия космической погоды. С научной точки зрения они представляют интерес, потому что они уносят магнитную энергию и плазму из солнечной или же звездной короны. Технологически они несут ответственность за наиболее экстремальные последствия космической погоды как на Земле, так и на других планетах и космических кораблях.

Результаты и их обсуждение

Мы изучили десять событий взаимодействующих КВМ, которые произошли в разное время, но были направлены в сторону Земли. Все эти события вызвали умеренные и сильные геомагнитные бури в течение солнечного цикла 24. Чтобы проанализировать межпланетные эффекты выбранных событий, мы исследовали различные параметры межпланетных, геомагнитных, земных магнитосферно-ионосферных и наземных наблюдений.

Измерения in-situ показывают, что последствиями взаимодействующих КВМ являются либо шок, либо структура наподобие двойного шока с наблюдающимися внезапными повышениями скорости, температуры и плотности на расстоянии в 1 а.е. от Солнца. Судя по наблюдениям, мы можем предположить, что от взаимодействующих КВМ имеют место различные геомагнитные последствия, чем от отдельных КВМ, по достижению ими магнитосферы. Мы попытались понять благоприятные условия для слияния КВМ, отклонения или отдельные структуры, типы геомагнитных бурь, то есть условия, которые приводят к одноступенчатым или двухступенчатым магнитным бурям. Мы также проанализировали среднечасовые данные интенсивности космических лучей (КЛ) с поправкой на давление от нейтронных мониторов. Во время большинства взаимодействующих событий КВМ интенсивность КЛ понижается, достигая глубины $\sim 3-6$ % от величины с длительным восстановительным периодом более 2–5 суток. Частично результаты приведены в Таблице.

Таблица. Межпланетные и геомагнитные характеристики взаимодействующих КВМ

Дата взаимодействующих КВМ	КВМ1 и КВМ2 Местоположение источника, NOAA No.	Направление распространения КВМ1 и КВМ2 (долгота)	Величина Dst (nT) и количество пиков	Шок S ₁ и S ₂	ФП (%)	Заметки
23 и 24 мая, 2010	11072, N19W12 11072, N18W26	11°, 28°	-80 Один пик	S	3	КВМ2 отклоняется
14 и 15 февраля, 2011	11158, S20W04 11158, S20W10	6°, -3°	-32 Один пик	S	4	Буря с большой продолжительностью
3 и 4 августа, 2011	11261, N16W30 11261, N19W36	14.8°, 19.2°	-115 Два пика Тип 2	S	5	Буря с длительной фазой восстановления (150 часов)

Дата взаимодействия КВМ	КВМ1 и КВМ2 Местоположение источника, NOAA No.	Направление рас- пространения КВМ1 и КВМ2 (долгота)	Величина Dst (нТ) и количество пиков	Шок S ₁ и S ₂	ФП (%)	Заметки
18 и 19 января, 2012	11401, N19E38 11402, N32E22	-2°, -77°	-71 Один пик	S	3	Буря с основной фазой 21 час и фазой восстано- вления 35 часов
4 и 5 марта, 2012	11429, N19E61 11429, N17E52	-28°, -32°	-85 Один пик	S1 и S2	4	Буря с основной фазой 5,5 часов и фазой восстано- вления 26 часов
13 и 14 июня, 2012	11504, S16E18 11504, S17E06	-15°, -2°	-86 Один пик	S1 и S2	5	Буря с длительной фазой восстано- вления (72 часа)
25 и 28 сентября, 2012	11575, N08W04 11575, N09W30	-19.5°, -26°	-117 Два пика Тип 2	S1 и S2	4	Двухступенчатая геомагнитная буря
9 и 10 ноября, 2012	11608, S20E09 11608, S21W04	-10°, -2°	-108 Один пик	S	4	Оболочка была впереди КВМ1
25 октября, 2013	11882, S08E73 11882, S06E69	-77°, -71°	-50 Два пика Тип 2	S	3	Двухступенчатая геомагнитная буря
14 и 15 марта, 2015	12297, S21W20 12297, S22W25	33°, -18°	-223 Два пика Тип 2	S	5	Двухступенчатая геомагнитная буря

Заключение

Взаимодействия типа КВМ-КВМ имеют большое значение с точки зрения космической погоды, их взаимодействие может повысить геоэффективность благодаря увеличенному периоду и усилению южной (отрицательной) компоненты межпланетного магнитного поля. Постоянство (продолжительность действия) южно-ориентированной компоненты магнитного поля играет более важную роль, чем значение его амплитуды, в возникновении геомагнитных бурь и суббурь. Некоторые из них приводят к двухступенчатым геомагнитным бурям, а некоторые – к одноступенчатым.

Форма и величина типичного двухступенчатого Форбуш понижения (ФП) на Земле вызывает депрессию космических лучей (КЛ) и длительный период восстановления. Анализ вариации КЛ более важен, потому что он даёт лучшее понимание различных структур солнечного ветра и геомагнитных бурь, более того, может помочь прояснить механизмы возникновения различных типов ФП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Srivastava N., Mirtoshev Z., Mishra W. Geomagnetic consequences of interacting CMEs of June 13–14, 2012 // Proceedings of the International Astronomical Union, Volume 13, Symposium S335: Space Weather of the Heliosphere: Processes and Forecasts, July 2017, pp. 65–68

МЕХАНИЗМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВАНИЯ КОРЫ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ РАДИОИЗЛУЧЕНИЕМ ИЗ ВНУТРЕННИХ СЛОЁВ

П.С. Таджимуратов

Астрономический институт АН РУз
tajimura@astrin.uz

Нейтронные звезды представляют собой природные астрофизические лаборатории сверхплотной материи. До сих пор неизвестны свойства материи, в том числе состав и уравнение состояния в их ядрах [1]. Различные теоретические модели предсказывают различные уравнения состояния и состав (нейтроны, протоны и электроны; гипероны; пионные или каонные конденсаты; деконфинированные кварки). Один из методов, используемых для исследования их внутренней структуры изолированных – моделирование их охлаждения [2]. Теоретические кривые охлаждения зависят от выбранной физической модели внутренностей звезды, в особенности от нейтринного излучения и теплоемкости, а также от сверхтекучести нейтронов и сверхпроводимости протонов в ядре. Сопоставление теории и наблюдений позволяет, например, ограничить диапазон критических температур сверхтекучести [3]. Наблюдение теплового излучения очень молодых НЗ (возраст менее 100 лет), открывает возможность изучения свойств коры НЗ. Вскоре после взрыва сверхновой молодая звезда имеет большие градиенты температуры во внутренних частях коры. В то время как мощное нейтринное излучение быстро охлаждает ядро, кора остается горячей. Тепло постепенно уходит внутрь в масштабе времени проводимости, и весь процесс можно представить как распространение волны охлаждения от центра к поверхности. Во время этой тепловой релаксации эффективная температура остается почти постоянной – около 250 эВ. Когда волна охлаждения достигает поверхности, эффективная температура резко падает на порядок величины в сценарии быстрого охлаждения и в 2–3 раза в сценарии медленного охлаждения. Продолжительность времени релаксации зависит в основном от теплоемкости и теплопроводности внутренней коры [4, 5]. В данной работе мы рассматриваем возможный новый механизм нагрева коры, обусловленный релятивистским излучением радиоволн из внутренних слоёв звезды.

Метрика пространства-времени в окрестностях медленно вращающейся НЗ в полярных координатах описывается следующим выражением:

$$ds^2 = -e^{2\Phi(r)} dt^2 + e^{2\Lambda(r)} dr^2 - 2\omega_{LT}(r)r^2 \sin^2\vartheta dt d\varphi + r^2(d\vartheta^2 + \sin^2\vartheta d\varphi^2)$$

где $\Phi(r)$ и $\Lambda(r)$ – метрические функции, $\omega_{LT}(r)$ – частота Лензе-Тирринга.

Используя внутреннее решение Шварцшильда для однородной несжимаемой жидкости мы выписали уравнения Максвелла в данной метрике и получили решения для электромагнитного поля. Магнитное поле звезды вкупе с её вращением индуцирует в ядре звезды распределение заряда, которое, из-за периодически происходящих в протонной жидкости ядра фазовых переходов из сверхпроводящего состояния в обычное, также периодически меняется, что производит к излучению электромагнитных волн из сверхпроводящего слоя. Характерная скорость фазового перехода определяет частоты этого излучения, которые соответствуют радиодиапазону – от 10 до 100 кГц. Кора НЗ является непрозрачной для данного излучения и поглощает его, что приводит к её нагреванию.

Мы вычислили светимость излучения и получили упрощенное выражение для оценки порядка величины. Однако, в контексте нагревания коры будет более наглядным ввести характерную теплопроводность нагрева:

$$\Sigma \sim \frac{L}{TR_S} \sim 10^4 \frac{v^2 \Omega^4 B^2 R_S^7}{c^5 T}$$

где L – светимость, Ω – частота вращения звезды, v – частота излучения, B – величина индукции магнитного поля, R_S – радиус Шварцшильда, T – поверхностная температура и c – скорость света в вакууме. Подставив характерные значения параметров НЗ получаем,

$$\Sigma_{max} = 100 \Sigma_{min} \sim 10^6 \frac{\Omega^4 B^2}{T}$$

для типичной молодой НЗ $\Omega = 10$ Гц, $B = 10^{12}$ Гс, $T = 10^{11}$ К, что даёт

$$\Sigma_{max} = 100 \Sigma_{min} \sim 10^{19} \frac{\text{эрг}}{\text{с} \times \text{К} \times \text{см}}$$

Что сравнимо с собственной теплопроводностью коры ($10^{18} - 10^{20}$ эрг/с×К×см)

ЛИТЕРАТУРА

1. Lattimer K.M., Prakash M., Neutron Star Structure and the Equation of State. The Astrophysical Journal, 550(1), 426–442 (2001)
2. Pethick C.J., Cooling of neutron stars. Rev. Mod. Phys., Vol. 64, Issue 4, 1133–1140 (1992)

**Международная радиообсерватория на плато Суффа:
перспективы развития миллиметровой и субмиллиметровой астрономии**

3. Yakovlev D.G., Levenfish K.P., Shibanov Yu.A., Cooling of neutron stars and superfluidity in their cores. *Physics-Uspokhi*, 42(8), 737–778 (1999)

4. Lattimer J.M., Van Riper K.A., Prakash M., Rapid cooling and the structure of neutron stars. *The Astrophysical Journal*, 425(2), 802–813 (1994)

5. Gnedin O.Y., Yakovlev D.G., Potekhin A.Y., Thermal relaxation in young neutron stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 324(3), 725–736 (2001)

ПРИЕМНИКИ ТГЦ ЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Вахс В.Л.

ИФМ РАН, Нижний Новгород, Россия
e-mail: vax@ipmras.ru

Аннотация

В докладе представлено современное состояние дел в области подходов к приему излучения ТГц диапазона, существующих приемников ТГц и их применения в различных приложениях. В докладе рассмотрены подходы к приему излучения в ТГц спектроскопии высокого разрешения и представлены результаты спектроскопического подхода к выявлению маркеров патологических состояний и заболеваний для целей медицинской диагностики и контроля хода лечения. Другим приложением, для которого актуально наличие приемника с высокой чувствительностью и низким уровнем собственных шумов, является беспроводная связь. В докладе представлен разработанный и реализованный лабораторный макет беспроводного канала связи на 220 ГГц.

Введение

Современные приложения, в которых используется излучение ТГц частотного диапазона (0,1-10 ТГц), охватывают такие области, как астрономия и астрофизика, биология, медицина, системы безопасности и др. [1,2] По сравнению с темпами развития источников ТГц излучения, технологии детектирования заметно отстают, т.к. они обычно основаны на элементной базе, имеющей свои пределы, такой как температурный эффект (например, ячейки Голя, болометры, термоэлектрические детекторы и т.д.) или узкий диапазон электронных детекторов (например, диоды Шоттки) в волноводных блоках. Эти пределы касаются или чувствительности, или диапазона модуляции или обоих. В исследовательских и прикладных задачах используются две системы – активные и пассивные. Активные системы характеризуются использованием достаточно мощных источников терагерцового излучения, освещающих объект, и регистрацией отраженного либо рассеянного излучения, при этом могут использоваться относительно малочувствительные неохлаждаемые приемники излучения. В пассивных системах, детектирующих ТГц излучение, испускаемое собственно объектом, необходимо иметь высокочувствительные приемники излучения, охлаждаемые до очень низких гелиевых температур [3].

Раздел 1. Детекторы на ДБШ

Переход металл-полупроводник, получаемый вакуумным напылением металла на полупроводник, называют переходом с барьером Шоттки. Детекторы и смесители на основе диодов с барьером Шоттки (ДБШ), выпускают, например, Virginia Diodes, Microtech Inc. (США). Компания Microtech Inc. (США) производит детекторы на основе GaAs в диапазоне 0.2-1.0 ТГц. Их чувствительность (10-9-10-10) на порядок хуже, чем у сверхпроводящих приемников. Основными преимуществами этих детекторов являются быстродействие (до 20 ТГц) и работа при комнатных температурах. Детекторы на ДБШ (Virginia Diodes) перекрывают низкочастотную часть ТГц диапазона WR10 (75-110 ТГц) до WR0.65 (1100-1700 ТГц. Недостатком работы диода Шоттки является узкая полоса пропускания (порядка 1 ТГц).

Раздел 2. Детекторы и смесители на СР

Другой перспективной структурой для создания детекторов и смесителей являются полупроводниковые сверхрешетки (СР) (последовательность чередующихся слоев GaAs (толщиной 4.0 нм) и AlAs (толщиной 0.9 нм)). СР характеризуются малыми значениями инертности и паразитных емкостей, ВАХ с отрицательной дифференциальной проводимостью (до 1 ТГц). С приложением внешнего электрического поля к СР можно менять подвижность электронов, при этом подвижность электронов уменьшается с увеличением приложенного поля. С помощью смесителя на СР были зарегистрированы гармоники генератора на лампе обратной волны 2-х мм диапазона вплоть до 8,1 ТГц [4].

Раздел 3. ТГц спектроскопия высокого разрешения

В ТГц спектроскопии во временной области (Time-domain spectroscopy) для детектирования ТГц излучения в непрерывном режиме в ТГц диапазоне, генерируемого с использованием лазеров ближнего ИК диапазона, применяются фотопроводящие переключатели на основе низкотемпературного арсенида галлия (LT-GaAs). [2]

В спектроскопии высокого разрешения на нестационарных эффектах применяются детекторы и смесители на диодах с барьером Шоттки и на сверхрешетках [4].

Раздел 4. ТГц связь

ТГц частотный диапазон перспективен для создания каналов беспроводной связи большой емкости с быстродействием 1-10 Гбит/с. На основе полупроводниковых приборов и фиксированных узконаправленных антенн

разработан и реализован лабораторный макет широкополосного приемопередатчика ТГц частотного диапазона (200-220 ГГц). Приведены результаты предварительного тестирования лабораторного макета широкополосного приемопередающего устройства, показавшие возможность передачи цифровых сигналов со скоростью до 1 ГГб/с на расстояние до 1 км. [5].

Заключение

Приемные устройства ТГц частотного диапазона позволяют детектировать сигналов самой различной интенсивности (от одиночных фотонов, до сигналов, имеющих достаточно высокую интенсивность). Среди приемников излучения для спектроскопии высокого разрешения перспективны работающие при комнатной температуре детекторы и смесители на ДБШ, а также на СР. Современные полупроводниковые устройства позволяют реализовать беспроводной канал связи ТГц частотного диапазона. Дальнейшее развитие предложенной схемы предполагает применение усилителей в передатчике и приемнике для увеличения выходной мощности и уменьшения коэффициента шума приемника.

Работы проводились в рамках госзадания (0030-2021-0024).

ЛИТЕРАТУРА

1. А.В. Степанов. Терагерцовое излучение солнца. Достижения и новые вызовы // Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике (БШФФ-2019). Лекция. С. 30–34
2. О.А. Smolyanskaya et al, Terahertz biophotonics as a tool for studies of dielectric and spectral properties of biological tissues and liquids, Progress in Quantum Electronics, Volume 62, November 2018, Pages 1–77
3. И.С. Гибин, П.Е. Котляр. Приемники излучения терагерцового диапазона (обзор)//Успехи прикладной физики, 2018, том 6, № 2, с.117–129
4. В.Л. Вакс и др. «Спектроскопия высокого разрешения терагерцового частотного диапазона для аналитических приложений» // УФН, 190 765–776 (2020)
5. Бирюков В.В. и др. Разработка беспроводной системы связи в субтерагерцовом частотном диапазоне//Изв.Вузов. Радиофизика. 2018, Т. 61, № 10, с. 856–866

2-ой Российско-Узбекистанский
научный семинар

**МЕЖДУНАРОДНАЯ
РАДИООБСЕРВАТОРИЯ
НА ПЛАТО СУФФА:
ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
МИЛЛИМЕТРОВОЙ
И СУБМИЛЛИМЕТРОВОЙ
АСТРОНОМИИ**

19–20 декабря 2022 г.
Самарканд, Узбекистан

Формат 70x100 1/16
Гарнитура Times
Усл.-п. л. 4,55. Уч.-изд. л. 2,2
Тираж 150 экз.

Издатель – Российская академия наук

Публикуется в авторской редакции

Верстка и печать – УНИД РАН
Отпечатано в экспериментальной цифровой типографии РАН

Распространяется бесплатно