

ОБЗОРЫ

УЛЬТРАФИОЛЕТОВАЯ АСТРОНОМИЯ: АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА "СПЕКТР-УФ" (WSO-UV)

Б.М.ШУСТОВ

Поступила 31 мая 2021

В кратком обзоре обсуждаются перспективы астрономических наблюдений в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне и перечисляется список направлений, в которых методы УФ-астрономии особенно востребованы. Некоторые астрофизические проблемы обсуждаются подробнее. В России и странах-партнерах создается международная ультрафиолетовая космическая обсерватория "Спектр-УФ" (международное название World Space Observatory - Ultraviolet). Российское и международное научное сообщество готовится к тому, что во второй половине 20-х годов многоцелевая обсерватория "Спектр-УФ" станет главным "ультрафиолетовым окном" во Вселенную. В статье кратко описаны основные характеристики проекта.

Ключевые слова: *УФ астрономия; проект "Спектр-УФ" (WSO-UV)*

1. *Введение. Ультрафиолетовая астрономия: общие понятия и предпосылки.* Современная астрономия - сложная разветвленная область знаний. В практике конкретных научных исследований термин "астрономия", как правило, используется с некоторым конкретизирующим определением, указывающим на специализацию данного научного направления. Можно встретить несколько десятков различных разновидностей "астрономий". Некоторые из них получили свое название по предмету исследования: звездная, внегалактическая, метеорная и т.д. Другие - по степени прикладного назначения: практическая, геодезическая, теоретическая и т.д. Пожалуй, наиболее часто употребляется выделение "астрономий" по спектральному (энергетическому) диапазону и по технологии наблюдений: гамма-, рентгеновская, оптическая, инфракрасная, радио, гравитационная и т.д. Конечно, все эти "астрономии" не являются изолированными друг от друга. Речь идет лишь о различных путях (технологиях, каналах) изучения объектов и процессов во Вселенной. Важнейшее значение имеет накопление, сопоставление и анализ всей совокупности данных наблюдений, полученных по разным каналам. Такой подход в последние годы принято называть многоканальной (в англоязычной литературе multimessenger) астрономией. Суть многоканального подхода

закключается в комплексном изучении электромагнитного излучения, гравитационных волн и элементарных частиц, таких как нейтрино и высокоэнергичные космические лучи, несущих информацию о космических объектах и процессах. Парадигму многоканальной астрономии можно считать уже общепринятой. Читатели могут обратиться к первой профессиональной книге по этому вопросу [1]. Многоканальный подход предполагает в том числе возможность наблюдения космических объектов на всех длинах волн электромагнитного излучения. Всеволновая концепция неизбежно предполагает привлечение средств наблюдения космического базирования, поскольку возможности наземных телескопов сильно ограничены прозрачностью земной атмосферы. Земная атмосфера непрозрачна почти во всем диапазоне длин волн электромагнитного спектра, простирающегося почти на 17 порядков - от жестких гамма-лучей с длиной волны 10^{-13} м до сверхдлинных радиоволн с длиной волны во много километров. Пропускание атмосферы на различных длинах волн проиллюстрировано на рис.1. Существующие окна прозрачности - светлые участки на графике - это те участки диапазона, которые доступны для наблюдений с наземными телескопами.

На рисунке выделен ультрафиолетовый (УФ) диапазон длин волн (10-400 нм). Земная атмосфера прозрачна в участке 320-400 нм, и, хотя визуально такое излучение не регистрируется, оно играет большое значение для многих (в том числе и биологических) процессов, происходящих на поверхности Земли и в ее атмосфере. В быту такое излучение называют ультрафиолетовым,

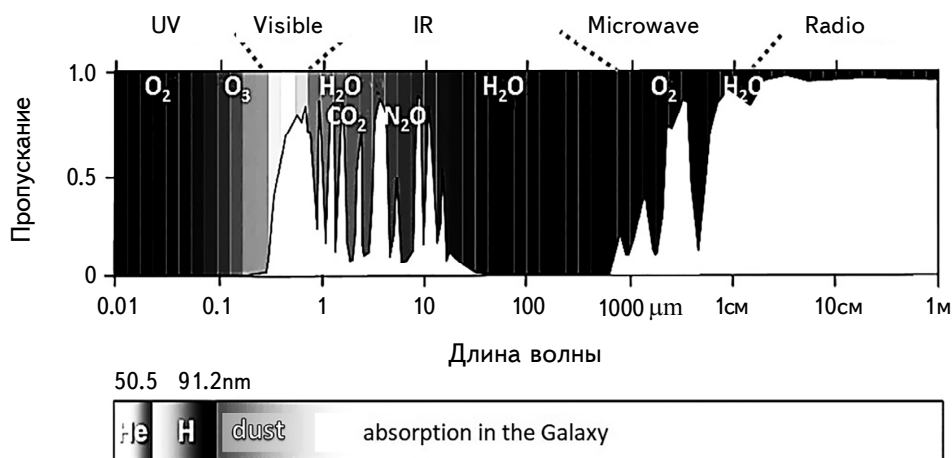


Рис.1. Пропускание земной атмосферы (верхняя панель). Показаны участки от УФ до радио. На длинах волн короче 0.01 мкм (т.е. в рентгеновском и гамма участках) атмосфера непрозрачна. На нижней панели проиллюстрирована непрозрачность межзвездной среды (МЗС) в Галактике. Показаны основные агенты (атомы, молекулы, пыль), ответственные за высокую непрозрачность земной атмосферы и МЗС.

но все же более правильно называть его атмосферным ультрафиолетовым. В атмосферном ультрафиолетовом участке проводятся важные астрофизические наблюдения. Здесь лежит полоса U (Ultraviolet) фотометрической системы UVB.

На более коротких волнах (за "порогом обрезания") атмосфера непрозрачна и наблюдения возможны только с помощью заатмосферных приборов. Значение длины волны порога обрезания зависит прежде всего от толщины атмосферного слоя (а также от состояния озонового слоя и содержания других молекул в атмосфере). Обычно за величину порога обрезания принимают значение 320 нм. На некоторых горных обсерваториях наблюдения возможны вплоть до 300 нм.

Астрономы выделяют следующие участки (приведены русскоязычные и англоязычные сокращения, поскольку они будут использованы далее):

- Ближний УФ (БУФ, NUV, 200-320 нм);
- Дальний УФ (ДУФ, FUV, 91.2-200 нм), в т.ч. лаймановский УФ (ЛУФ, LUV, 91.2-121.6 нм), у которого нижняя граница соответствует лаймановскому пределу для атомарного водорода, а верхний - длине волны линии L_{α} водорода;
- Крайний или Экстремальный УФ (КУФ, EUV, 10-91.2 нм), у которого нижняя граница по длине волны является одновременно верхней границей рентгеновского диапазона.

Астрономы под термином "ультрафиолетовая астрономия" чаще всего понимают исследования Вселенной именно в участке 10-320 нм. Важное значение УФ-астрономии обусловлено прежде всего тем, что большая часть наблюдаемого вещества во Вселенной находится в состоянии, которое наиболее эффективно диагностируется методами УФ-спектроскопии. Это и атомарная плазма при температурах 3000-300000 К и более холодное молекулярное вещество в поле УФ-излучения, т.к. электронные переходы самых распространенных молекул во Вселенной - H_2 , CO, O, CS, C_2 и т.д. - лежат именно в УФ. Информация содержится и в непрерывном спектре астрофизических источников, и в линиях различных химических элементов. На рис.2 проиллюстрировано резкое возрастание информативности спектров астрофизических объектов с уменьшением длины волны. Показаны рабочие диапазоны длин волн для наземных наблюдений и для космических обсерваторий: Космический телескоп "Хаббл" (Hubble Space Telescope, HST), Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer (FUSE), а также российской обсерватории "Спектр-УФ". Проект "Спектр-УФ" подробнее описан далее.

Важным обстоятельством, увеличивающим притягательность УФ-наблюдений, является низкий уровень фона в УФ. Если предметом изучения не является сам фон (его источники, их пространственное распределение и т.д.), то он

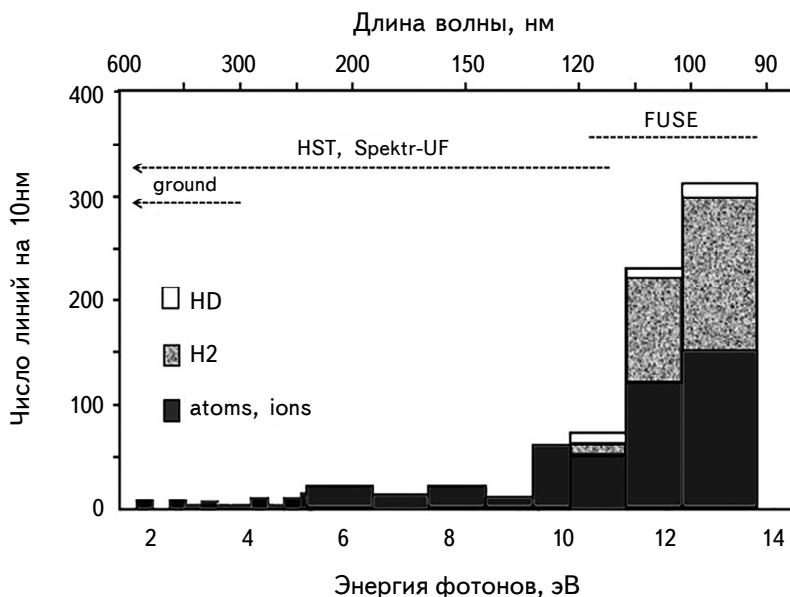


Рис.2. Число линий поглощения на интервал длин волн шириной 10 нм в зависимости от длины волны (энергии фотонов). Рисунок адаптирован из финального отчета по фазе А, выполненного группой экспертов проекта FUSE (США).

рассматривается как помеха (шум). Напомним, что важнейшим параметром, характеризующим качество астрофизических наблюдений, является отношение "сигнал/шум" (S/N). Чем выше отношение S/N , тем больше полезной информации можно получить из данных наблюдений. Составляющие шума разнообразны. Это и различные шумы, присущие инструменту наблюдений (например, шумы приемника излучения, рассеянный свет в телескопе и в научном приборе), которые всегда стараются уменьшить за счет применения более совершенных технологий, и естественный шум, т.н. фоновый шум или просто фон, который нельзя уменьшить, но нужно учитывать. Если сравнивать фон космического излучения за пределами атмосферы в диапазоне длин волн, включающем УФ, видимый и ИК участки, то в УФ фон на порядки величины ниже. Это означает, что естественный шум здесь меньше влияет на качество получаемой наблюдательной информации, чем при использовании других спектральных каналов. На рис.3 показан уровень фона ночного неба в зените при отличных условиях наблюдений с земной поверхности и заатмосферный фон неба в направлении, типичном для наблюдений внегалактических объектов. Основные составляющие фона - зодиакальный свет и диффузное галактическое УФ-излучение, источники которого разнообразны, но главный вклад вносят звезды спектрального класса А. Рисунок адаптирован

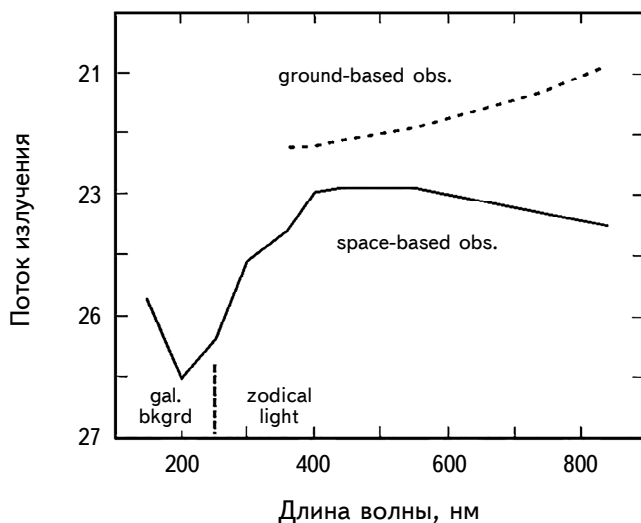


Рис.3. Фон неба в УФ, видимом и ближнем ИК-участках спектра. Фоновый поток излучения в единицах "звездная величина с квадратной угловой секунды" дан в зависимости от длины волны.

из <http://www.astro.virginia.edu/class/oconnell/astr511/UV-astron-f01.html>).

Широкий набор научных целей и большие возможности УФ-технологий наблюдений Вселенной объясняют, почему за период развития УФ-астрономии (около 55 лет) в мире проведено множество кратковременных космических экспериментов и запущено более полутора десятков долговременных УФ-обсерваторий для наблюдений объектов в этом диапазоне (см. табл.1). В табл.1 жирным шрифтом отмечены названия проектов, в которых именно УФ-наблюдения были главной задачей, остальные обсерватории имели (имеют) на борту УФ-инструменты в составе комплекса научной аппаратуры. Все обозначения в таблице вполне понятны. Пояснений требуют только режимы. Для режима наблюдения *s* обозначает, что использован спектроскопический инструмент, *i* - УФ-камера, *p* - поляриметр, для режима наведения *s* означает сканирующий режим, а *p* - режим наведения на конкретные объекты.

Список краткосрочных экспериментов слишком велик для этой статьи. Отметим лишь два эксперимента, проведенных на пилотируемых космических аппаратах. В 1972г. американский астронавт Джон Юнг в рамках проекта "Аполлон" использовал на Луне 75-мм УФ-камеру для фотографирования Большого Магелланова Облака. Фотографии в УФ показали, что распределения молодых (горячих и поэтому ярких в УФ) звезд и более старых звезд, максимум излучения которых находится в видимой области спектра, сильно отличаются. Молодые звезды распределены по всему объему этой небольшой галактики, тогда как старые концентрируются к ее центру. Один из первых

Таблица 1

КОСМИЧЕСКИЕ ОБСЕРВАТОРИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В УФ

Обсерватория	Агентство	Год и месяц запуска и завершения	Диаметр телескопа см	Режим наведения	Режим наблюдения	$\lambda\lambda$ нм
ОАО-2	NASA	1968.12-1973.01	20	sp	is	100-425
TD-1A	ESRO	1972.03-1974.05	28	s	is	135-280+
ОАО-3	NASA	1972.08-1981.02	80	p	s	90-315
ANS	SRON	1974.08-1977.06	22	p	s	150-330+
IUE	ESA+	1978.01-1996.09	45	p	s	115-320
АСТРОН	СССР	1983.03-1989.06	80	p	s	110-350+
EXOSAT	ESA	1983.05-1986	2x30	p	is	25+
ROSAT	DLR	1990.06-1999.02	84	sp	i	6-20+
HST	NASA	1990.04-2021?	240	p	isp	115-1000
EUVE	NASA	1992.06-2001.01	40	sp	is	7-76
FUSE	NASA	1999.06-2007.07	4x(39x35)	p	s	90.5-119.5
GALEX	NASA	2003.04-2013.06	50	sp	is	9-26
FIMS	KARI	2003.09-2008	(5x8)	s	s	135-280
SWIFT	NASA	2004.11-	30	p	is	90-175
ASTROSAT	ISRO	2015.09-	2x38	sp	is	170-650

крупных отечественных УФ- экспериментов был проведен в 1973г., когда на борту КА "Союз-13" космонавты П.И.Климук и В.В.Лебедев с помощью 22-см телескопа обсерватории ОРИОН-2 (научный руководитель Г.Гурздян) провели фотографические наблюдения звезд до 13-й величины с пред-объективной призмой. Для 900 звезд был составлен каталог распределений энергии в диапазоне 200-380 нм [2].

История ранних этапов развития УФ-астрономии, как технологии, описана, в частности, в обзоре [3], история УФ-спектроскопии в работе [4], современное состояние технологий УФ-астрономии и краткий экскурс в перспективы описаны, в частности, в написанной Б.М.Шустовым главе "Ультрафиолетовый диапазон" книги [1].

Созданная и запущенная в СССР космическая обсерватория "Астрон" с крупнейшим на тот период 80-см УФ-телескопом "Спика" (см. [5]) также внесла существенный вклад. В частности, по профилям резонансных УФ-линий изучены особенности истечения вещества из звезд различных спектральных классов; уточнено содержание химических элементов в атмосферах необычных (пекулярных) звезд классов Ар и Am; обнаружена вода в коме кометы Галлея и получен спектр вспышки сверхновой в Большом Магеллановом Облаке (SN1987A).

Перечислим наиболее выдающиеся фундаментальные астрономические

достижения, полученные методами УФ-астрономии в предыдущие годы:

- Прямое обнаружение молекул H_2 . Эту наиболее распространенную молекулу во Вселенной нельзя обнаружить ни в видимом, ни в радио диапазонах спектра. С помощью УФ-спектрографа в ракетном проекте Aerobee-150 были обнаружены резонансные L_α полосы этой молекулы в спектре звезды ξ Per [6];

- Открытие горячей фазы межзвездной среды. Это открытие, сделанное с помощью космической УФ-обсерватории Copernicus совершенно изменило наши представления о структуре и эволюции, как межзвездной среды, так и галактик в целом [7];

- Определение относительного содержания дейтерия к водороду, чрезвычайно важной величины, определяющей выбор космологической модели Вселенной. Здесь были использованы возможности КА Copernicus [8] и FUSE [14];

- Массовое высокоточное определение химического состава звезд. Только методами УФ-спектроскопии удалось с высокой точностью определить из чего состоят внешние слои (атмосферы) звезд и межзвездный газ. Здесь особенно велика роль обсерватории IUE (International Ultraviolet Explorer) [9];

- Наблюдения скрытого барионного вещества в локальной Вселенной ($z < 2$). Наиболее важные наблюдения выполнены на космических обсерваториях HST [10] и FUSE [14];

- Выявление природы структур и процессов во внешних областях атмосфер планет-гигантов. Огромный вклад здесь внесен работами, выполненными по УФ-наблюдениям на HST и с УФ-инструментами на космических аппаратах (КА) для исследования дальнего космоса [11,12].

Конечно, этот список достижений не отражает всего богатства направлений астрономических исследований, в которых востребованы методы УФ-астрономии. Приведем список этих направлений (неполный и, возможно, отражающий субъективные представления автора статьи):

- Солнечная корона и активные области на Солнце;
- УФ-свечения атмосферы Земли при входах энергичных γ -квантов;
- Исследования истечений газа из ядер комет;
- Процессы фотохимии в комах комет;
- Физика высокоскоростных ударов метеороидов о поверхности безатмосферных космических тел;

- Физико-химические процессы в верхней атмосфере и экзосфере планет и спутников планет Солнечной системы;

- Торы, хвосты и другие формы истечения нейтрального газа из тел Солнечной системы;

- Исследования экзокометной активности;

- Истечения из атмосфер горячих юпитеров и других экзопланет;
- Сигнатуры озона и кислорода (биомаркеров) в атмосферах экзопланет;
- Активность М-карликов и радиационные условия для биосфер экзопланет;
- Образование звезд и планетных систем;
- Звездные хромосферы, звездные ветры (особенно потеря массы массивными звездами);
- Физика белых карликов и других горячих звезд;
- Массообмен и аккреция в двойных системах (особенно в системах с компактным компонентом - белым карликом, нейтронной звездой и т.д.);
- Поздние стадии эволюции звезд (звезды горизонтальной ветви, звезды на ветви ЕНВ и пост-AGB звезды);
- Физика вспышек сверхновых (особенно УФ-спектры сверхновых SNIa);
- Идентификация и интерпретация звездных популяций в шаровых скоплениях;
- Межзвездная пыль (состав и распределение по размерам);
- Астрохимия в межзвездной среде (особенно в фото-диссоциационных областях);
- Тепло-горячая фаза межзвездной и межгалактической среды (МГС);
- Галактический ветер, галактические фонтаны, окологалактическая пыль;
- Нейтральный окологалактический газ и аккреция из МГС;
- Диффузная фаза МГС среды в ближней Вселенной ($z < 2$);
- Химическое содержание элементов в звездах и химическая эволюция Галактики;
- Распределение энергии в спектрах галактик как результат галактической эволюции;
- Массивное звездообразование и история галактик;
- Активные галактические ядра (аккреционные диски, околоядерная плазма);
- Содержание дейтерия в межгалактической среде и других объектах;
- Измерения Лайман-континуума в эпоху реионизации на $z > 6$;
- Лайман-альфа картирование космической паутины;
- Тепловая и химическая эволюция межгалактической среды, резервуары скрытых барионов, скрытых металлов.

Исследования в этих направлениях, как правило, ведутся преимущественно в избранных участках УФ. Например, участок КУФ мало используется в астрофизических исследованиях. Дело в том, что межзвездное вещество практически непрозрачно в КУФ на линейных масштабах более ~ 1 пк (см. рис.1). Детальная картина распределения нейтрального водорода довольно сложна, существуют несколько окон, в которых межзвездная среда (МЗС)

прозрачна на масштабах в десятки парсек в силу высокой степени ионизованности водорода в этих направлениях. Это, обычно, области "ожогов", оставшихся от вспышек сверхновых. В 1992г. в США была запущена обсерватории EUVE (Extreme Ultraviolet Explorer), на которой были установлены телескопы, предназначенные для проведения обзора в КУФ и для проведения спектральных наблюдений отдельных объектов [13]. Обсерватория прекрасно работала с технической точки зрения. Однако по результатам наблюдений EUVE оказалось, что число обнаруженных источников в участке 40-70 нм крайне мало. Это свидетельствует не о "нехватке" источников в КУФ, а о высокой непрозрачности МЗС в этом участке спектра. На длинах волн $\lambda < 30$ нм межзвездная среда прозрачнее, поскольку в КУФ-участке поглощение падает с частотой ν как ν^{-3} , и число обнаруженных источников возрастает. Эти результаты объясняют, в частности, тот факт, что в отличие от физики Солнца, где наблюдения в КУФ дают важнейшую информацию, последующих больших астрофизических проектов для наблюдений в КУФ нет. Поэтому в дальнейшем мы будем обсуждать астрофизические наблюдения, подразумевая, главным образом, участок 91.2-320 нм.

2. *Ультрафиолетовая астрофизика: новые задачи.* Для описания хотя бы единичных примеров исследований по каждому пункту из представленного выше длинного списка перспективных направлений УФ-астрономии понадобится целая книга. В этом кратком обзоре мы представим лишь несколько наиболее ярких, с точки зрения автора, примеров.

Наблюдательное определение полной массы барионов и доли тяжелых элементов (т.н. металлов) во Вселенной важно для проверки космологических представлений и моделей эволюции галактик и межгалактической среды (МГС). Здесь выявились две фундаментальные проблемы: проблема "скрытых барионов" и проблема "скрытых металлов".

По современным моделям плотность барионного вещества во Вселенной оценивается примерно в 4% от ее полной плотности. Подсчет наблюдаемой барионной массы на красных смещениях $z > 2$ находится в примерном соответствии с теорией. А вот плотность наблюдаемого вещества в локальной Вселенной ($z < 2$) составляет всего лишь около 50% от теоретической [15,16]. В качестве основного резервуара остальных (ненаблюдаемых) барионов обсуждается диффузное межгалактическое вещество, большая часть массы которого находится в двух состояниях (фазах) - диффузной и тепло-горячей [17-19]. Диффузная фаза - это относительно холодный ($T < 10^4$ K) газ (состоит в основном из водорода), наблюдающийся, в частности, в L_{α} -линиях поглощения водорода в спектрах далеких квазаров (см. рис.4, верхняя панель, адаптировано из [20]). Тепло-горячая фаза - это газ, нагретый ударными процессами до температур $T = 10^5 - 10^7$ K. Этот газ

можно обнаружить только по УФ-наблюдениям спектральных линий высокоионизованных атомов при $T < 3 \cdot 10^5$ К (см. рис.4, нижняя панель), либо по рентгеновским спектрам (при более высоких температурах).

Остается актуальной проблема "скрытых металлов", состоящая в том, что количество тяжелых элементов, которое должно быть, согласно теории, произведено звездами в галактиках и выброшенного в МГС, оказывается существенно больше реально наблюдаемого их количества в галактиках и в окрестностях галактик ([21,22]). Это проиллюстрировано на рис.5 (адаптирован из [21]). Видно, что общая масса металлов, производимых сверхновыми и звездами AGB (теория), заметно больше, чем получаемые (суммарно) из наблюдений масса металлов, находящаяся в настоящее время в звездах, масса металлов в межзвездном газе и масса металлов в пыли. Это различие несколько меньше в массивных галактиках со звездообразованием, но остается заметным.

По-видимому, такое различие объясняется тем, что более насыщенные металлами мелкие конденсации из-за их малого геометрического сечения труднее обнаружить.

Вследствие этого масса металлов будет систематически недооцениваться [23]. Эти теоретические представления нужно тщательно проверять. Наблюдения УФ-спектров тяжелых элементов в окологалактической (на расстояниях

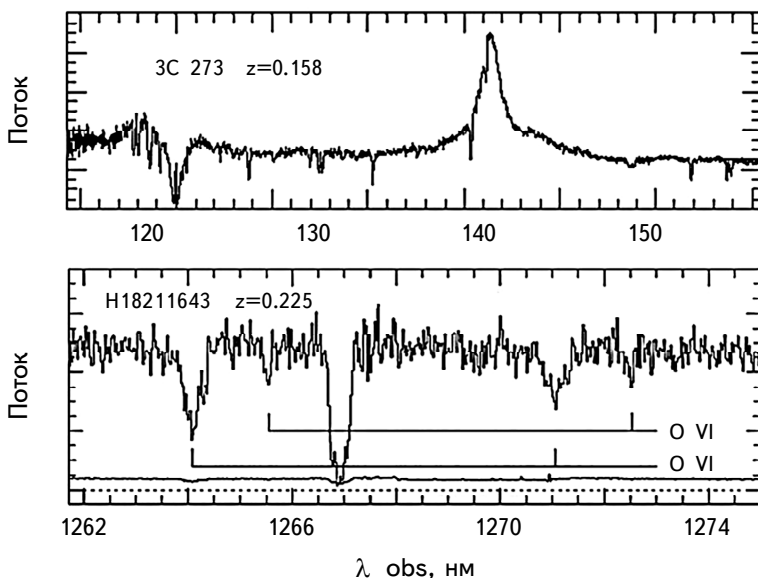


Рис.4. Вверху - спектр квазара 3C273, в котором видны линия эмиссии $\text{Ly}\alpha$ водорода ($\lambda_{\text{набл}} = 141.5$ нм) и линии $\text{Ly}\alpha$ поглощения облаками водорода, расположенными на меньших z (диффузная фаза). Наблюдения получены с помощью спектрографа GHRS/HST [20]. Внизу - спектр квазара H18211643. Видны линии поглощения облаков OVI (тепло-горячая фаза). Наблюдения получены с помощью спектрографа STIS/HST [10].

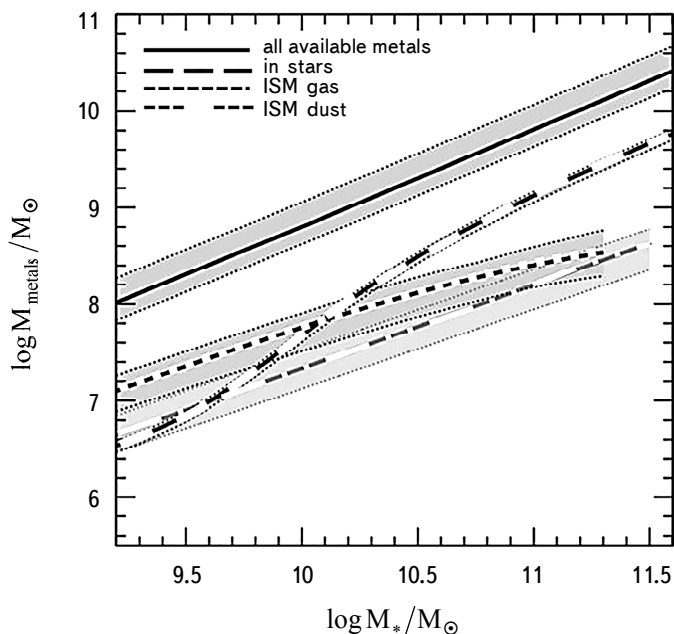


Рис.5. Общая масса металлов, производимых сверхновыми и звездами AGB (теория), масса металлов, находящаяся в настоящее время в звездах, межзвездном газе и в межзвездной пыли (из [21]). Дисперсия показана штриховкой полутоном.

от галактик до 150 кпк) среде весьма востребованы.

Эволюция Вселенной в звездную эпоху в основном определяется историей звездообразования. Изучать историю звездообразования в галактиках можно, анализируя распределение энергии в спектрах галактик. Для этого можно использовать спектры низкого разрешения и даже фотометрические измерения. Одной из главных задач УФ-обсерватории GALEX было как раз проведение таких наблюдений [24]. УФ-излучение галактик определяется количеством молодых и достаточно массивных звезд. Поскольку такие звезды живут относительно недолго, то их количество является индикатором текущего темпа звездообразования. Темп звездообразования в массивных галактиках может сильно зависеть от возраста галактик. На рис.6 показаны теоретические спектры галактики для разных возрастов и металличностей.

Понятно, что, наблюдая УФ-спектр галактики, можно судить о темпе звездообразования в галактике, а используя модель звездообразования, определить возраст галактики.

Наше нынешнее понимание ранней химической эволюции Вселенной состоит в том, что первое поколение звезд (звезды населения III) было сформировано из первичного газа, полностью лишенного металлов. Это население состояло из массивных короткоживущих звезд массой в сотни-

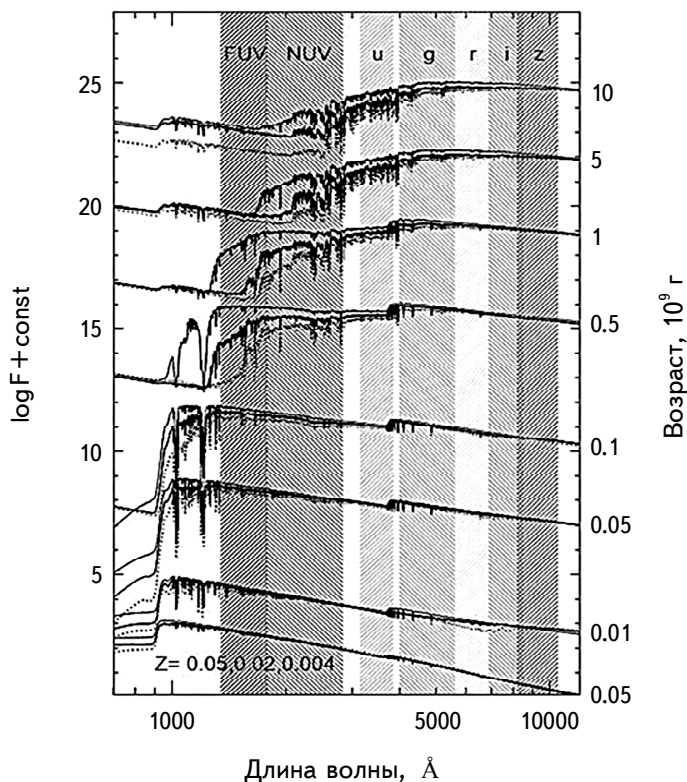


Рис.6. Теоретическая эволюция распределения энергии в спектре галактики для разных металличностей: солнечной ($Z = 0.02$) - жирные линии, более высокой - тонкие линии, меньшей - пунктир. Вертикальные полосы соответствуют полосам фильтров GALEX и SDSS [24]. Указаны модельные возрасты галактики.

тысячи масс Солнца. Эти объекты взорвались как сверхновые, распространяя в межзвездной среде металлы, которые были синтезированы в недрах таких необычных звезд. Причиной массивности первых звезд является очень малая непрозрачность первичного газа (из-за отсутствия металлов), обусловившая высокий темп аккреции на протозвездное ядро. Вновь образовавшиеся звезды следующего поколения уже имели в своем составе некоторое количество металлов и их массы были уже более характерными для современной Вселенной. Маломассивные и поэтому долгоживущие звезды очень низкой металличности ($[\text{Fe}/\text{H}] < -5.0$) с необычным химическим составом рассматриваются как "мостик" к эпохе первых звезд [25]. Химический состав таких звезд дает нам косвенную информацию о природе звезд населения III. Информация будет точнее, если у звезды измеряется больше линий химических элементов и изотопных соотношений. К сожалению, чем ниже металличность звезды, тем слабее линии. Особенно это критично для линий в видимом диапазоне, а

вот в УФ-спектры гораздо богаче (см. рис.7).

Из рис.7, адаптированного из [26], видно, что важные для проверки модели первичного нуклеосинтеза элементы (например, Si, P, Fe, Zn), не обнаруживаются в оптической области спектра. Наиболее сильные переходы отмечаются в УФ-диапазоне.

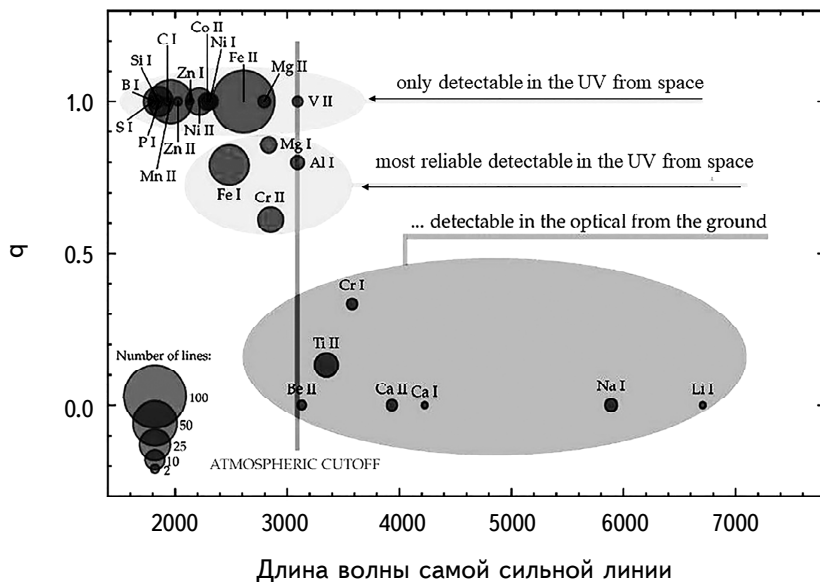


Рис.7. Доля q достаточно сильных для спектрального анализа УФ-линий химических элементов в спектре низкометаллической звезды [26]. Оценки основаны на расчетах силы линий в спектре карликовой звезды с $T_{\text{eff}} = 6000$ K, $\log(g) = 4.2$ и $[\text{Fe}/\text{H}] = -5$.

Эволюция (обычных) звезд до главной последовательности, особенно в контексте формирования планетных систем - весьма "популярное" поле приложения методов УФ-астрономии. Энергия аккреции на ранних стадиях эволюции частично преобразуется в энергию ионизирующего излучения, которое влияет на эволюцию протопланетного диска и последующее формирование планет. Проблемы, касающиеся природы этих механизмов, их эволюции и влияния на химическую эволюцию внутреннего диска, во многом остаются нерешенными. Необходимы наблюдения в УФ-диапазоне, чтобы исследовать эволюцию звездных атмосфер и истечений и их влияние на атмосферы планет. Молодые объекты взаимодействуют с окружающей средой, в которую они погружены, и характеризуются высокой степенью активности. У них наблюдаются большие избытки инфракрасного и УФ-излучения и очень часто - эмиссионные линии. Дополнительная энергия выделяется в ударных волнах на поверхности и при гравитационно-магнитном взаимодействии между звездой и диском. Кинетическая энергия падающего вещества идет на

нагрев газа в месте падения. Если вещество падает вдоль силовых линий магнитного поля, то температура газа может превышать 10^6 К [27]. Рентгеновское излучение от фронта ударной волны ионизует падающий газ, который излучает, преимущественно, в УФ-диапазоне. Анализ УФ-спектра позволяет определять темп аккреции [28]. Аккреционные ударные волны наблюдаются как горячие пятна на поверхности и являются источниками излучения, модулированного вращением, которое может наблюдаться в видимом и УФ-диапазонах [29]. Эти наблюдения дают важную информацию о геометрии магнитосферы и характеристиках аккреционной ударной волны.

В последнее время особый интерес к проявлениям активности звезд связан с тематикой экзопланет. Тема экзопланет и, в частности, вопросы, связанные с возможностью условий существования жизни на некоторых из них, привлекают повышенное внимание. Звезды М-карлики являются основными целями для поиска экзопланет из-за их относительной близости к нам. Однако потенциальная обитаемость, да и само существование атмосфер

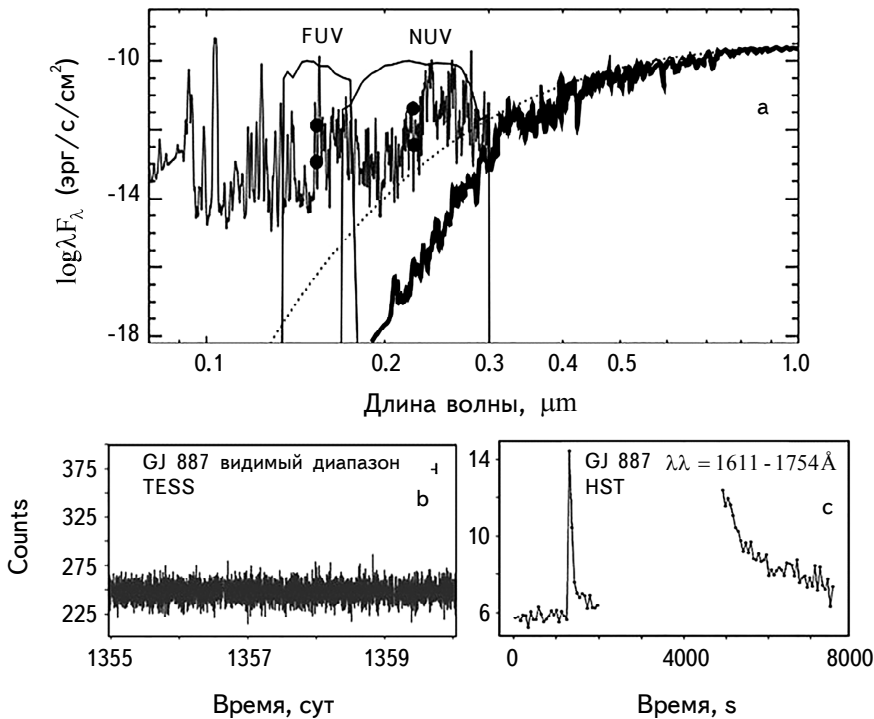


Рис.8. Вверху - модельный спектр М карлика ($T_{\text{eff}} = 3500$ К, возраст 50 млн лет): жирная черная кривая - спектр фотосферы, тонкая - суммарный спектр фотосферы и верхней атмосферы, пунктир - чернотельный спектр; показаны фотометрические полосы NUV и FUV обсерватории GALEX [31]. Внизу слева - кривая блеска М-карлика GJ 887 в оптическом диапазоне (по наблюдениям на КА TESS [32]), внизу справа - одна из вспышек этой звезды, зарегистрированная в УФ с помощью HST [33].

в этих экзопланетных системах критически зависят от истории высокоэнергичного звездного излучения: от рентгена до УФ. Например, КУФ-излучение молодых М-звезд может разрушать атмосферу планет (земель, суперземель) при масштабах сотен миллионов лет [30]. Особенно сильно проявляется роль УФ во время (супер)вспышек. Вспышки М-звезд в УФ происходят регулярно. Наблюдения М-карликов в УФ - весьма актуальное направление современной астрофизики. На рис.8 (вверху) показан модельный спектр М-карлика [31]. Видно, что относительный поток в БУФ и ДУФ от хромосферы звезды (на рисунке показаны близкие к БУФ и ДУФ фотометрические полосы NUV и FUV обсерватории GALEX) на многие порядки превышает фотосферные значения. Более того, УФ-поток может сильно изменяться вспышечным образом. На левой нижней диаграмме показана кривая блеска М-карлика GJ 887 в оптическом диапазоне (по наблюдениям на КА TESS [32]). Видно, что поток постоянен на временном интервале около месяца. На правой нижней диаграмме показана одна из вспышек этой же звезды, зарегистрированная в УФ с помощью HST [33]. Здесь поток существенно меняется на гораздо более короткой шкале (десятки минут).

3. *Многоцелевая обсерватория "Спектр-УФ"*. В духе обсуждавшегося во *Введении* всеволнового подхода в России реализуется серия космических обсерваторий "Спектр". Успешно проработала на орбите в течение 7 лет радиоастрономическая обсерватория "Спектр-Р" (запуск 2011г. [34,35]), в 2019г. запущена на орбиту рентгеновская обсерватория "Спектр-РГ", которая уже выдала уникальные научные результаты [36,37]. На очереди проект ультрафиолетовой обсерватории "Спектр-УФ". Ее запуск запланирован на 2025г. Российское и международное научное сообщество готовится к тому, что во второй половине 20-х годов многоцелевая обсерватория "Спектр-УФ" станет главным "ультрафиолетовым окном" во Вселенную. Здесь описаны основные характеристики проекта, которые могут быть полезны тем исследователям, которые будут использовать эту обсерваторию.

Крупный космический проект с общей структурной точки зрения рассматривается как космический комплекс (КК). КК "Спектр-УФ" включает в себя космический аппарат (КА), наземный сегмент (НС) и ракетно-космический комплекс (РКК). Мы не будем останавливаться на описании РКК и его компонентов, включающих: ракету-носитель, стартовый комплекс космодрома, комплекс средств измерений, сбора и обработки информации на участке выведения, т.к. эти компоненты более-менее стандартны для всех проектов. Возможны выбор ракеты-носителя, разгонного блока и наземных средств управления из ограниченного списка. Для вывода КА "Спектр-УФ" планируется использовать ракету-носитель "Ангара". Кратко остановимся на описании КА

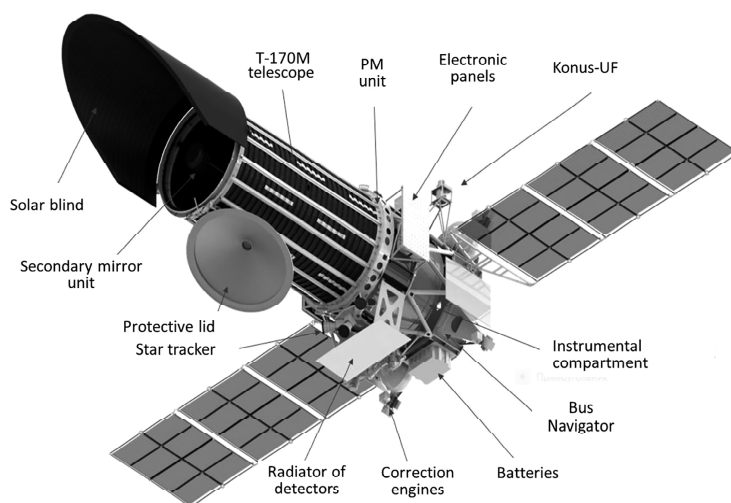


Рис.9. Общий вид КА "Спектр-УФ".

и НС, поскольку именно они определяют техническую и организационную специфику проекта. На рис.9 показан общий вид КА "Спектр-УФ". Главные компоненты КА - служебный модуль (платформа) и полезная нагрузка - комплекс научной аппаратуры (КНА).

В качестве служебного модуля используется модуль "Навигатор", который разработан как универсальный служебный модуль для ряда космических проектов. Он уже неоднократно и вполне успешно показал себя в проектах "Спектр-Р", "Спектр-РГ" и в КА дистанционного зондирования "Электро-Л"

Таблица 2

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КА "СПЕКТР-УФ"

Характеристика	Значение
Время активного существования	более 5 лет
Масса КА (с топливом)	2900 кг
Масса полезной нагрузки	1625.5 кг
Мощность, потребляемая полезной нагрузкой	до 750 Вт
Скорость передачи научных данных	более 2 Мбит/с
Точность наведения с помощью Системы датчиков гида	0.1 угл. с
Точность стабилизации угловой ориентации (на уровне 3σ) на характерном времени экспозиции 1 час	0.1 угл.с
Орбита геосинхронная; наклонение	35 градусов

и "Арктика-М". Основные общие характеристики КА "Спектр-УФ", в том числе обеспечиваемые служебным модулем "Навигатор", приведены в табл.2. Более подробно см. описание проекта в [38,39].

В состав КНА "Спектр-УФ" входят:

- Телескоп Т-170М (апертура 170см, фокальное отношение 10, диаметр поля зрения 30', дифракционное качество изображения в центре поля);
- Блок спектрографов (БС), включающий три канала: вакуумный ультрафиолетовый эшелъный спектрограф ВУФЭС, ультрафиолетовый эшелъный спектрограф УФЭС и спектрограф с длинной щелью СДЩ;
- Блок камер поля (БКП), включающий каналы дальнего УФ и ближнего УФ;
- Блок управления научными данными (БУНД);
- Научная аппаратура "Конус-УФ" небольшой детектор гамма-излучения, разработанный в ФТИ им. А.Ф.Иоффе РАН, и уже неоднократно успешно использованный в космосе в других проектах.

Подробные описания основных инструментов можно найти: телескопа -

Таблица 3

ОСНОВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕЛЕСКОПА Т-170М

Тип оптической системы	Ричи-Кретьен
Диаметр апертуры D	1700 мм
Фокальное отношение	10.0
Угловой диаметр поля зрения	0°.50 (200 мм)
Доступный спектральный диапазон	110-700 нм

в [40], БС в [41,42], БКП в [43]. Здесь приведем лишь краткие сведения о характеристиках основных научных приборов в сжатом табличном виде и проиллюстрируем рабочие моменты их создания.

В табл.3 приведены самые общие характеристики телескопа Т-170М. Это крупный космический телескоп, позволяющий собирать достаточно УФ-фотонов для проведения наблюдений самых далеких и слабых объектов.

На рис.10 показаны рабочие моменты создания оптических элементов и тестирования механической конструкции телескопа Т-170М. Отметим только, что все механические испытания проведены успешно и показали соответствие параметров телескопа заданным требованиям. Для проведения главных оптических тестов телескопа в сборе в АО "НПО Лавочкина" создан уникальный стенд.

Спектрографы и камеры поля являются основными приборами обсерватории "Спектр-УФ". Предусмотрены два спектрографа (канала) высокого разрешения

Таблица 4

**ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛОВ БЛОКА
СПЕКТРОГРАФОВ ОБСЕРВАТОРИИ "СПЕКТР-УФ"**

Канал	Спектральный диапазон	Разрешающая сила R
УФЭС	174-310 нм	>50000
ВУФЭС	110-176 нм	>50000
СДЩ	110-320 нм	1000-2500 Пространственное разрешение 0.5-1"

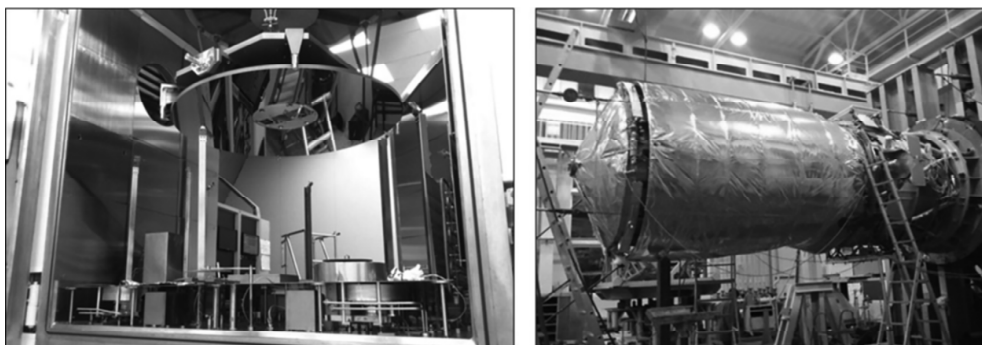


Рис.10. Рабочие моменты создания телескопа Т-170М. Слева - главное зеркало телескопа на этапе нанесения специальных покрытий оптических поверхностей в НПО "Луч". Справа - механические испытания телескопа Т-170М на транспортные вибростатические нагрузки в АО "НПО Лавочкина".

($R > 50000$) и один спектрограф (канал) с высокой (длинной) щелью и низким спектральным разрешением ($R \sim 1000$). Все спектрографы объединены в Блок спектрографов (БС). Обозначения и основные характеристики каналов приведены в табл.4.

Блок спектрографов (БС) - сложный инструмент и над его созданием работает большая команда. Уникальная оптическая схема БС, рассчитанная специалистами САО РАН, позволила максимально использовать возможности телескопа Т-170М, поэтому можно надеяться на рекордные (для инструмента такого класса) показатели эффективности. На рис.11 (слева) представлены оценки эффективных площадей, рассчитанных для каналов УФЭС и ВУФЭС в сопоставлении с данными для спектрографов COS/HST и STIS/HST. Отметим, что спектральное разрешение каналов УФЭС и ВУФЭС сопоставимо с разрешением спектрографа STIS (HST) с эшелле решетками E140 и E230, но

выше максимального разрешения, достигаемого при наблюдениях с HST COS (R = 20000). В ДУФ (канал ВУФЭС) эффективная площадь сопоставима с

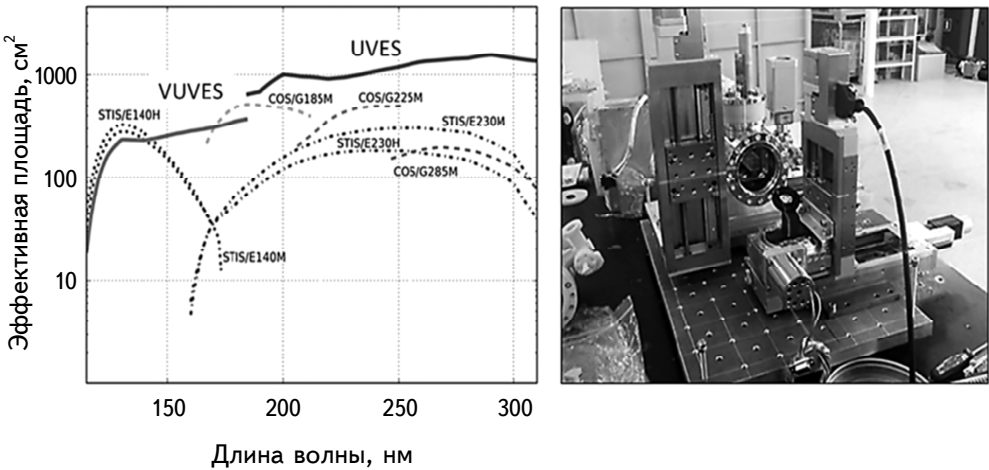


Рис.11. Слева - эффективные площади каналов УФЭС и ВУФЭС в сопоставлении с данными для спектрографов COS/HST и STIS/HST. Справа - испытания фотоприемного устройства в Институте ядерной физики СО РАН.

показателями инструментов HST, а в области ближнего УФ (канал УФЭС) может превосходить их, даже несмотря на то, что площадь поверхности зеркала телескопа Т-170М примерно в два раза меньше, чем у HST. Измерения чувствительности приемников БС в Институте ядерной физики СО РАН (см. рис.11) подтвердили эти показатели.

Блок камер поля (БКП) включает каналы дальнего (ДУФ) и ближнего (БУФ) ультрафиолетового излучения, позволяющие строить высококачественные изображения астрономических объектов. Применение ПЗС в канале БУФ дает принципиальную возможность наблюдений не только в УФ, но и в более длинноволновом диапазоне. Охлаждение ПЗС-приемника БУФ канала до низкой температуры (-100С) позволит достичь проникающей способности до

Таблица 5

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БКП

Канал	Диапазон (нм)	Тип приемника	Масштаб (угл. с/пиксель)	Поле зрения (угл. с)	Количество фильтров
ДУФ (FUV)	115-176	МКП	0.047	162	до 10 (возможно использование призм)
БУФ (NUV)	174-310	ПЗС	0.146	451	до 15

25-й звездной величины. Относительно большое поле зрения обеспечивает сравнительно высокую эффективность в поисково-обзорном режиме работы. БКП имеет субсекундное угловое разрешение, причем в канале ДУФ достигается сверхвысокое угловое разрешение. Самые общие параметры каналов приведены в табл.5. Подробнее о современном статусе БКП см. в [43].

Как и для блока спектрографов пришлось использовать приемники излучения иностранного производства. На рис.12 (слева) показан рабочий момент испытаний оптико-механического блока БКП в лаборатории ФИАН, справа показан приемник на основе микроканальных пластин (МКП). Приемник поставляется испанскими партнерами.

В последние годы интерес к участию в проекте проявляет Япония. От

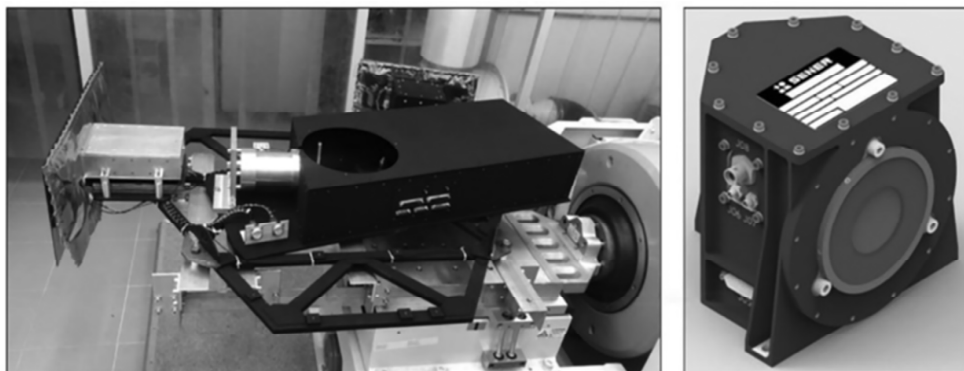


Рис.12. Слева - испытания оптико-механического блока БКП в лаборатории ФИАН. Справа - МКП приемник канала ДУФ (фирма SENER, Испания).

японской стороны поступило предложение о включении в состав БКП дополнительного канала (спектрографа) для исследования экзосфер землеподобных экзопланет. В кооперации с Японским аэрокосмическим агентством JAXA и рядом ведущих университетов Японии, группа российских научных центров (ИКИ, ИНАСАН, ФИАН и др.) ведет работы по созданию УФ-спектрографа UVSPEX в составе БКП ([44]).

Приведем сведения об организационных принципах использования обсерватории. В первые два года работы обсерватории "Спектр-УФ" наблюдательное время будет распределено между тремя направлениями: Базовой программой (Core Program, приблизительно 50% от общего времени), Национальными программам стран-участниц (приблизительно 40% от общего наблюдательного времени, пропорционально финансовым вкладам стран в проект) и Открытой программой (Open Program, включающей заявки, представляющие высокую научную значимость, в том числе и от ученых из стран, не участвующих в реализации проекта).

Все предложения, принятые в рамках Базовой программы, являются крупными программами, требующими не менее 100 часов наблюдательного времени. Часть заявок для Базовой программы предполагает длительную подготовку, в том числе проведение предварительных наблюдений на телескопах наземного базирования. Получение наблюдательного времени на крупнейших наземных телескопах проходит процедуру конкурсного научного отбора и планируется заранее. Принимая это во внимание, Научный управляющий комитет проекта "Спектр-УФ" в июне 2018г. объявил первый сбор именно таких заявок (требующих существенной наземной подготовки) для включения в Базовую программу. Сбор заявок проходил через веб-сайт Российско-Испанского Центра по Ультрафиолетовой Астрономии (JCUVA, <https://wso-jcuva.ucm.es/>). Из поступивших заявок, созданных с привлечением международных экспертов из России, Испании, Италии и Франции, Программный комитет в феврале 2019г. выбрал 17 проектов (см. [45]). Поддержанные заявки составят приблизительно 20% времени, выделяемого на Базовую программу. В 2021г. будет составлен окончательный список заявок обсуждаемого здесь вида для Базовой программы.

4. Краткие выводы.

1. Многоцелевая космическая обсерватория "Спектр-УФ" будет использована в научных исследованиях широким кругом российских и зарубежных астрономов и физиков.

2. Актуальность научных задач космической обсерватории "Спектр-УФ", наиболее полно обсуждаемых в [46], сохраняется, но с развитием науки появилось несколько новых задач.

3. Проект "Спектр-УФ" находится в зрелой стадии развития. Принципиальных технических трудностей для реализации проекта нет. Запуск в 2025г. реален.

4. Астрономическому сообществу пора готовиться к этому.

Институт астрономии РАН,
Москва, e-mail: bshustov@mail.ru

ULTRAVIOLET ASTRONOMY: ASTROPHYSICAL PERSPECTIVES OF THE SPEKTR-UV PROJECT (WSO-UV)

B.M.SHUSTOV

A brief overview of the prospects of astronomical observations in the ultraviolet (UV) range and list the areas in which UV astronomy methods are particularly in demand are presented. Some astrophysical problems are discussed in more detail. The international ultraviolet space observatory "Spektr-UV" (the international name World Space Observatory-Ultraviolet) is being created in Russia and the partner countries. The Russian and international scientific community is preparing for the fact that in the second half of the 20s, the multi-purpose observatory WSO-UV will become the main "ultraviolet window" to the Universe. The main characteristics of the project are briefly described.

Keywords: *UV astronomy: Spektr-UV (WSO-UV) project*

ЛИТЕРАТУРА

1. *М.Б.Шустов*, Многоканальная астрономия, под ред. А.М.Черепашука, М., Век-2, 2018.
2. *G.A.Gurzadyan*, SPIE Conference Series, **4060**, 156, 2000.
3. *E.I.Moskalenko*, Methods of extra-atmospheric astronomy, М., Nauka, pp.280, 1984, In Russian.
4. *V.E.Panchuk, B.M.Shustov, M.V.Yushkin*, J. of Optical Technology, **73**, 256, 2006.
5. *A.A.Boyarchuk*, Astrophysical research with the space station "Astron", М., Nauka, 1994.
6. *G.R.Carruthers*, Astrophys. J. Lett., **161**, L81, 1970.
7. *E.B.Jenkins, D.A.Meloy*, Astrophys. J. Lett., **193**, L121, 1974.
8. *J.B.Rogerson, D.G.York*, Astrophys. J. Lett., **186**, L956, 1973.
9. Ultraviolet astrophysics beyond the IUE final archive, eds: W.Wamsteker, R.Gonzalez Riestra, ESA Publications Division, 1998.
10. *T.M.Tripp, B.D.Savage, E.B.Jenkins*, Astrophys. J., **534**, L1, 2000.
11. *J.D.Nichols, S.V.Badman, E.J.Bunce et al.*, Icarus, **263**, 17, 2016.
12. *L.M.Trafton, J.C.Gerard, G.Munhoven et al.*, Astrophys. J., **421**, 816, 1994.
13. *M.M.Sirk, J.V.Vallerga, D.S.Finley et al.*, Astrophys. J. Suppl. Ser., **110**, 347,

1997.

14. *S.Mathur, F.Nicastro, R.Williams*, in *Astrophysics in the Far Ultraviolet: Five Years of Discovery with FUSE*, ed. G.Sonneborn et al., Publ. Astron. Soc. Pacif., Ser., **348**, 354, 200.
15. *M.Fukugita, C.J.Hogan, P.J.E.Peebles*, *Astrophys. J.*, **503**, 518, 1998.
16. *M.McQuinn*, *Astrophys. J. Lett.*, **780**, L33, 2014.
17. *J.N.Bregman*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **45**, 221, 2007.
18. *J.M.Shull, B.D.Smith, C.W.Danforth*, *Astrophys. J.*, **759**, 23, 2012.
19. *J.Tumlinson, C.Thorn, J.K.Werk et al.*, *Science*, **334**, 948, 2011.
20. *J.C.Brandt, S.R.Heap, E.A.Beaver*, *Astron. J.*, **105**, 831, 1993.
21. *M.S.Peebles, J.K.Werk, J.Tumlinson et al.*, *Astrophys. J.*, **786**, 54, 2014.
22. *J.X.Prochaska, J.K.Werk, G.Worseck*, *Astrophys. J.*, **837**, 169, 2017.
23. *E.O.Vasiliev, S.Yu.Dedikov, Yu.A.Shchekinov*, *Astrophys. Bull.*, **64**, 317, 2009.
24. *L.Bianchi*, *Astrophys. Space Sci.*, **335**, 51, 2011.
25. *A.A.Kabanov, B.M.Shustov*, *ARep*, **55**, 784, 2011.
26. *I.Roederer*, *Astro2020*, № 49; *BAAS*, **51**, Issue 3, id. 49, 2019.
27. *S.A.Lamzin*, *A.Rep*, **42**, 322L, *S.A.Lamzin*, 1998.
28. *L.Ingleby, N.Calvet, G.Herczeg et al.*, *Astrophys. J.*, **767**, 112, 2013.
29. *A.I.Gomez de Castro, M.Fernandez*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **283**, 55, 1996.
30. *R.O.Loyd, E.L.Shkolnik, A.C.Schneider et al.*, *Astrophys. J.*, **867**, 70, 2018.
31. *E.L.Shkolnik, T.S.Barman*, *Astron. J.*, **148**, 64, 2014.
32. *S.V.Jeffers, S.Dreizler, J.R.Barnes et al.*, *Science*, **368**, 1477, 2020.
33. *R.O.Loyd, E.L.Shkolnik, K.France et al.*, *Research Notes of the AAS*, **4**, id. 119, 2020.
34. *Yu.A.Alexandrov, V.V.Andreyanov, N.G.Babakin*, *SoSyR*, **46**, 458, 2012.
35. *N.S.Kardashev, A.V.Alakoz, A.S.Andrianov*, *SoSyR*, **51**, 535, 2017.
36. *M.Pavlinisky, R.Sunyaev, E.Churazov*, *SPIE*, **7437**, id. 743708, 2009.
37. *R.Sunyaev, V.Arefiev, V.Babyshkin*, *arXiv:2104.13267*, 2021.
38. *B.Shustov, M.Sachkov, E.Kanev et al.*, *Astrophys. Space Sci.*, **363**, 62, 2018.
39. *Б.М.Шустов, Л.Бейтия-Антеро, Х.К.Вальехо и др.*, *Вестник НПО им. С.А.Лавочкина*, № 2 (48), 22, 2020.
40. *О.В.Власенко, А.Л.Яскович, Б.М.Шустов и др.*, *Вестник НПО им. С.А.Лавочкина*, №5, 67, 2014.
41. *M.Sachkov, V.Panchuk, M.Yushkin*, *SPIE*, **9905**, 37, 2016.
42. *И.С.Саванов, Б.М.Шустов, М.Е.Сачков и др.*, *Научные труды ИНАСАН*, **1**, 364, 2018.
43. *M.Sachkov, S.Sichevsky, B.Shustov*, *SPIE*, **11444**, 74, 2020.
44. *S.Kameda, G.Murakami, A.Tavrov et al.*, *SPIE*, **11444**, 0L, 2020.
45. *M.Sachkov, A.I.Gomez De Castro, B.Shustov*, *COSPAR*, 2018cosp...42E2932S, 2018.
46. *A.A.Boyarchuk, B.M.Shustov, I.S.Savanov et al.*, *ARep*, **60**, 1, 2016.