

Астрофизика ИК диапазона

Емельянов Эдуард Владимирович

28 августа 2009 г.

Содержание

1	Введение	2
2	История развития астрофизики ИК–диапазона	3
2.1	XIX век	3
2.2	Первая половина XX века	4
2.3	Вторая половина XX века	5
2.4	Начало современной ИК–астрофизики	5
2.4.1	Наземные телескопы инфракрасного диапазона	6
2.4.2	Аэрокосмическая астрономия	6
2.4.3	Космическая ИК–астрономия	7
3	Системы охлаждения для ИК астрофизики	9
4	Светоприемники и оптические системы	11
4.1	КМОП–матрицы	13
4.1.1	HgCdTe детекторы	14
4.1.2	ИВС–матрицы	14
4.1.3	Светоприемники на квантовых ямах	15
4.2	Болометры	16
4.3	Оптические материалы	17
5	Методы исследований в астрофизике ИК–диапазона	18
5.1	Фотометрия	18
5.1.1	Фотометрические системы	18
5.1.2	ИК–фильтры	19
5.1.3	Фотометры	21
5.2	Спектроскопия	23
5.3	Спектрофотометрия	26
6	Обработка ИК–изображений	27
6.1	Определение параметров светоприемника	27
6.2	Коррекция плоских полей	28
6.3	Вычитание небесного фона	28
6.4	Определение относительного смещения кадров	29
6.5	Получение панорамного изображения	29

6.6 Системы сбора и обработки данных	30
--	----

Список литературы

30

1 Введение

Несмотря на то, что фотографические пластинки имеют низкую чувствительность в ИК–диапазоне, астрофотометрические исследования в близком ИК начали проводиться еще в фотографическую эпоху, т.к. это были единственные доступные двумерные светоприемники, имеющие к тому же сравнительно линейную чувствительность и низкий уровень шумов.

Уже с 10-х гг. прошлого века астрофизики начали пытаться получить звездные спектры в ИК–диапазоне. Однако, низкая чувствительность фотопластинок в красном и инфракрасном диапазонах не позволяла выйти за пределы длины волны 1 мкм. С использованием лучших фотографических материалов самые качественные спектры получались в диапазоне $6800 \div 8600 \text{ \AA}$ — очень близком инфракрасном участке [24].

Для исследований в ближнем ИК длительное время использовались технологии повышения чувствительности фотографического материала, разработанные еще в XIX веке. Эти технологии были рассчитаны на работу при температурах больших 0°C — и из-за значительных тепловых шумов было нерациональным расширять область чувствительности такого материала выше 2 мкм. К классическим технологиям повышения чувствительности фотографического материала в красном и ИК–диапазонах можно отнести следующие [38]:

- использование красителей, расширяющих диапазон чувствительности фотопластинки до 8900 \AA ;
- методы на основе эффекта Гершеля, расширяющие диапазон до 10140 \AA ;
- «эвапорография» — метод, основанный на зависимости скорости испарения или сублимации фотографического субстрата от интенсивности ИК–излучения, чувствительный вплоть до 9 нм (не нашедший широкого применения из-за практической сложности реализации);
- фосфорография, основанная на зависимости интенсивности люминесцентного излучения от воздействия ИК–излучения, данный метод имеет ограничение порядка 1.8 мкм.

После уменьшения нижнего предела рабочих температур фотопластинок появилась возможность расширить диапазон их чувствительности. Например, специальная химическая технология позволяла повысить концентрацию ионов серебра в подложке фотопластинки [34]. После этой процедуры фотопластинка помещалась в вакуумную камеру, в которой охлаждалась до температуры $\sim -40^\circ\text{C}$. Несмотря на сильно заваливающуюся в области больших длин волн квантовую эффективность таких фотопластинок, данную методику использовали в фотометрии, получая довольно приемлемые результаты в диапазоне длин волн до 4 мкм.

Астрофизические исследования в более удаленном ИК–диапазоне стали возможными начиная с 1950х гг. — после изобретения низкотемпературных болометров. При охлаждении германиевого болометра жидким гелием до температуры $\sim 2 \text{ K}$ для наблюдений была доступна область $1 \div 10 \text{ мкм}$ [22]. Для работы при более высоких температурах ($\sim 77 \text{ K}$) использовались PbS болометры, имеющие наибольшую чувствительность в областях $2.2 \div 3.6 \text{ мкм}$ [16]. Использование болометров на основе сульфида свинца началось еще в конце сороковых–начале пятидесятых гг. прошлого века [18, 12]. Изначально ИК–болометры были одноканальными, поэтому остро стояла задача разработки многоканального светоприемника для

инфракрасной спектральной области.

После открытия ПЗС-регистров в ИК-астрономии начали использоваться комбинированные ИК ПЗС-матрицы, в которых для генерации электронов использовались чувствительные в ИК-области фотодиоды (например, InSb), а для накопления и передачи заряда — ПЗС-регистры. Светоприемник такого типа размером 32×32 пикселя нашел применение в ИК-камере Рочестерского университета [45]. Камера предназначалась для диапазона $1 \div 5$ мкм, при этом в области $3.8 \div 4.7$ мкм квантовая эффективность светоприемника была выше 0.6. Рабочая температура светоприемника поддерживалась на уровне 40 К. Несмотря на малые размеры светоприемника, данная камера позволяла проводить ИК-фотометрию в малых полях.

Исследования в областях $5 \div 35$ мкм проводились при помощи галлий-германиевых болометров. При объединении этих болометров в матрицы возникали проблемы, связанные с размерами светочувствительного элемента $0.3 \times 0.3 \times 0.3$ мм., недостаточно малыми для простого введения матрицы в фокальную плоскость телескопа, но и вместе с тем недостаточно большими для индивидуального распределения света на них. При работе с подобными светоприемниками использовалась модуляция светового пучка посредством качающегося вторичного зеркала телескопа. Демодуляция сигнала производилась ЭВМ [3].

Основным недостатком светоприемников, работающих в ИК-диапазоне, была необходимость охлаждения до $2 \div 20$ К с использованием более дорогого, нежели жидкий азот, жидкого гелия. Так, например, светоприемник камеры TIRCAM, разработанной для итальянского ИК-телескопа TIRGO, представлял собой кремниево-галлиевую матрицу 20×64 пикселей и работал при температуре $15 \div 17$ К. Однако, благодаря такой низкой рабочей температуре, этот светоприемник имел довольно плоскую кривую чувствительности в диапазоне $8 \div 18$ мкм [40].

Таким образом, проведение исследований в ИК-диапазоне являлось довольно дорогостоящей задачей, как по стоимости аппаратуры, так и по обеспечению ее эксплуатации. Появление ртуть-кадмий-теллуридных (HgCdTe) светоприемников позволило оптимизировать соотношение цена/качество ИК-светоприемника. Область их наилучшей чувствительности лежит в диапазоне $2 \div 5$ мкм, в то время как они работают при температуре жидкого (значительно реже — твердого) азота. Одним из первых HgCdTe светоприемников была французская гибридная матрица 32×32 пикселя, в которой генерирующийся фотодиодами заряд накапливался в ПЗС-ячейках [54]. Большая вместимость ячеек камеры ($2 \cdot 10^7$ электронов) позволяла использовать этот светоприемник при наблюдениях с высоким уровнем фона.

2 История развития астрофизики ИК-диапазона

В наше время астрофизике ИК-диапазона уделяется все большее и большее внимание. Вместе с тем это — самое молодое направление астрофизики. Несмотря на то, что первые попытки проведения наблюдений в инфракрасном диапазоне были сделаны еще в XIX веке, уверенно развиваться это направление стало всего лишь пять десятков лет назад. Рассмотрим ключевые этапы истории ИК-астрофизики [33].

2.1 XIX век

Одним из первых наблюдения небесных объектов в ИК-диапазоне осуществил У. Хаггинс (W. Huggins, 1869), использовавший в качестве детектора простую термопару, подключен-

ную к гальванометру. Наблюдая при помощи такого простого ИК-болометра на 8-дюймовом рефракторе яркие звезды, Хаггинс зафиксировал инфракрасное излучение у Сириуса, Поллукса, Арктура и Регула. Е.Ф. Стоун (E.F. Stone, 1870) повысил надежность измерений, используя сдвоенную термопару для компенсации изменения температуры инструмента и флуктуаций теплового фона неба. Стоун также отметил существование ИК-излучения у Арктура и Веги.

Т.А. Эдисон попробовал использовать в качестве ИК-приемника тазиметр. В основе тазиметра лежал микрофонный капсюль с угольным порошком внутри. В него упирался рычажок из эбонита. ИК-излучение нагревало рычажок, что приводило к его удлинению и надавливанию на микрофон. При этом сопротивление угольного порошка скачком падало, и стрелка гальванометра отклонялась. Для испытания своего изобретения Эдисон в 1878 г. выполнил наблюдение солнечного затмения. Измерение температуры короны Солнца позволило бы определить ее природу. В качестве источника калибровки Эдисон использовал Арктур. Однако, тазиметр оказался довольно нестабильным в работе, кроме того, телескопы того времени были сравнительно небольшими, и полностью отсутствовали компенсации внешних тепловых источников и, прежде всего, самого телескопа. Проблема создания более чувствительного ИК-детектора и экранирования его от внешних тепловых источников не могла быть разрешена в XIX веке.

2.2 Первая половина XX века

Первые количественные результаты ИК-фотометрии принадлежат Е.Ф. Николсу (E.F. Nichols, 1901), обнаружившему разницу в ИК-излучении Веги и Арктура на 0.9^m . Николс сделал вывод, что двукратное превышение мощности ИК-излучения Арктура по сравнению с Вегой, несмотря на более низкую температуру Арктура, говорит о том, что угловые размеры Арктура должны быть больше, чем Веги.

У.У. Кобленц (W.W. Coblentz, 1914) улучшил методику наблюдения в ИК-диапазоне путем внесения защиты от внешних тепловых потоков (посредством помещения сдвоенной термопары в вакуум) и выделения избранных диапазонов длин волн (посредством фильтров из желтого и красного стекла, ячейки с водой, толстой пластины кварца). Из наблюдения сотен звезд Кобленц уточнил их эффективные температуры. Можно сказать, что Кобленц был первым астрономом ИК-диапазона.

Работу Кобленца продолжили Петтит и Николсон (E. Pettit & S.V. Nicholson, 1922), оптимизировавшие детектор на термопарах. Результаты их наблюдений на 100-дюймовом телескопе Mt. Wilson совсем незначительно отличаются от современных значений. Основным источником ошибок в определении эффективной температуры звезд у Петтита и Николсона были неточные значения видимых звездных величин исследуемых объектов. Их работа (1928) по исследованию эффективных температур звезд была интересна подробным описанием методов точной фотометрии, включая учет погрешности, возникающей за счет потускнения серебряного покрытия зеркал телескопа.

Параллельно с Петтитом и Николсоном Абботт (C.G. Abbott, 1929) использовал призму с низкой дисперсией для получения ИК-спектров звезд. Его наблюдения были еще довольно грубыми и не позволили выявить особенностей инфракрасных спектров звезд разных спектральных классов.

Несмотря на исследования вышеупомянутых авторов, большинство астрофизиков считали наблюдения в ИК-диапазоне неуместными и неточными, что привело к некоторому застою в астрофизике ИК-диапазона до 50-х гг. XX века.

2.3 Вторая половина XX века

Через некоторое время после публикации работ Петтита и Николсона Уитфорд (A.E. Whitford, 1948) провел наблюдения нескольких звезд в ближнем ИК-диапазоне для дополнения кривой межзвездной экстинкции. Термопары он заменил фотопроводящей ячейкой из сульфида свинца, а гальванометр — электроникой, основанной на вакуумных лампах. Куйпер с соавторами (G.P. Kuiper, 1947) использовали подобный светоприемник в ИК-спектрометре для получения звездных спектров.

Феллжетт (P.V. Fellgett, 1951) отметил, что используемая Уитфордом технология лишь незначительно улучшила метод Петтита и Николсона. Проведенные им измерения для сравнения обеих технологий показали расхождение между результатами не более 0.08^m . Во время своих наблюдений Феллжетт выявил флуктуации ИК излучения звезд за счет атмосферной экстинкции. Он заявил: «... существует мало шансов на обнаружение в инфракрасной области звезд, слишком холодных, чтобы быть заметными в видимом диапазоне».

Следующий шаг в ИК-астрофизике был сделан В.И. Морозом (1960). Его фотометр был основан на фотоячейках из сульфида свинца и германия, фильтрация ИК-диапазона производилась при помощи незначительно измененных водяных ячеек Кобленца. Он исследовал такие протяженные объекты как Крабовидная туманность, центр Галактики, туманность в созвездии Ориона.

Коннес (P. Connes, 1984) разработал ИК-спектрометры высокого разрешения. Он провел несколько наблюдений звезд, из которых получил детальный список абсорбционных линий холодных звезд. Основной же целью разработанного им инструмента были планетарные исследования.

2.4 Начало современной ИК-астрофизики

Развитие технологий во второй половине XX века позволило улучшить методы наблюдения в ИК-диапазоне. Электронное накопление сигнала позволило увеличить время экспозиции и значительно увеличить отношение сигнал/шум. Разработка интерференционных ИК-фильтров позволила улучшить качество выделения избранных спектральных полос для фотометрии. Бурное развитие радиоастрономии позволило выявлять объекты для дальнейшего исследования в ИК-диапазоне.

В 60-х–70-х гг. XX века был построен фундамент современной ИК-астрофизики:

- Создание фотометрической системы, ее калибровка и применение для большого числа звезд.
- Завершение полного обзора неба, успешно опровергнувшего заявление Феллжетта о трудности обнаружения ИК-звезд.
- Регистрация внутренней тепловой энергии Юпитера и других планет-гигантов.
- Исследование областей межзвездной пыли, богатых кислородом и углеродом.
- Исследование молодых звезд в протозвездных пылевых облаках.
- Обнаружение областей формирования молодых массивных звезд, излучающих в широкой полосе дальнего инфракрасного диапазона.
- Исследование центра Млечного Пути как в линиях звездной эмиссии, так и в полосах теплового переизлучения звездной энергии межзвездной пылью.
- Обнаружение мощного ИК излучения в галактиках с активным звездообразованием и исследование ярких и сверхъярких ИК галактик.
- Обнаружение ИК избытка, связанного с активностью галактических ядер.

В то же время производились необходимые изменения технической стороны ИК-астрофизики: оптимизация наземных телескопов для наблюдения в инфракрасном диапазоне; развитие авиационной ИК-астрономии; развитие космических ИК-телескопов.

Кроме того, астрофизика ИК-диапазона заинтересовала экологов с точки зрения исследования изменения состава земной атмосферы, непосредственно влияющего на ее прозрачность в этом диапазоне.

2.4.1 Наземные телескопы инфракрасного диапазона

Первым шагом в инфракрасном телескопостроении был созданный в 1979 г. при поддержке NASA 3-м телескоп IRTF (Infrared Telescope Facility). В то же время был построен британский 3.8-м телескоп UKIRT (UK Infrared Telescope). Оба телескопа были установлены в местах с низкой влажностью (Мауна Кеа, Гавайи, высота 4200 м.) для расширения доступного ИК диапазона.

В 1975 г. были созданы фотодиоды из антимонида индия (InSb), значительно превосходящие по качеству ячейки из сульфида свинца. Развитию ИК-астрофизики способствовало создание двумерных инфракрасных светоприемников и успехи космического спутника IRAS (Infrared Astronomical Satellite).

Первым матричным светоприемником была созданная А. Хоффманом (Alan Hoffman, 1985) InSb матрица 32×32 пикселя. Подобная матрица, но на основе ртути-кадмий-теллурических ячеек, была изготовлена в 1987 г. научным центром Рокуэлл (Rockwell Science Center). В обоих случаях для считывания сигнала с ячеек использовались ПЗС. Однако, ПЗС несовместимы с качественными ИК-приемниками из-за низкой рабочей температуры. При этом ПЗС работают в режиме поверхностной проводимости, что значительно повышает их шум считывания. Этот недостаток был вскоре устранен путем внедрения усилителей сигнала в каждую ячейку матрицы, что позволяло значительно увеличить сигнал/шум при переносе заряда. Первый светоприемник такого типа, нашедший широкое применение, имел формат 58×62 пикселя.

Вскоре после распространения первых оптимизированных для астрофизических исследований ИК-светоприемников были построены крупные ИК-телескопы. Использование адаптивной оптики позволяет получить на таких телескопах ИК-изображения, ограниченные лишь дифракционным пределом. По сравнению с инфракрасной астрономией 70-х гг. прошлого века, достигнуто значительное улучшение чувствительности, многоканальности, углового разрешения и отношения сигнал/шум.

2.4.2 Аэрокосмическая астрономия

Первые исследования в ИК-диапазоне с борта самолета осуществил Френк Лоу (Frank Low). Эти исследования проводились при помощи малых телескопов, что не позволяло изучать слабые объекты. С 1972 г. NASA начало проводить исследования в инфракрасном диапазоне с борта самолета при помощи 90-см телескопа. В мае 1975 г. на базе этого телескопа была создана Авиационная обсерватория им. Койпера (Kuiper Airborne Observatory). Эта обсерватория просуществовала около 20 лет, выполняя около 70 вылетов в год.

Использование воздушных шаров для выноса ИК-телескопов в верхние слои атмосферы имело переменную популярность. Первые спектры в ближнем ИК-диапазоне были получены при помощи телескопа Стратоскоп-II в 1964 г. В 1977 г. для исследований использовался 1-м телескоп, также поднимаемый при помощи воздушного шара. Успешные наблюдения

проводились и при помощи 2-м телескопа BLAST (2008 г.), оснащенного чувствительным ИК-светоприемником. Но подавляющее большинство наблюдений в дальнем ИК-диапазоне проводилось при помощи авиационных телескопов.

В 1996 г. NASA совместно с Германией развернуло проект стратосферной обсерватории для ИК астрономии (SOFIA, Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy). SOFIA базируется на 2.5-м телескопе, размещенном на борту самолета Боинг-747. Из-за финансовых трудностей в начале нашего века работа этой обсерватории была приостановлена, но в 2006 г. возобновилась. Основатели SOFIA надеются, что эта обсерватория проработает в течение 20 лет.

2.4.3 Космическая ИК-астрономия [21]

В 1970 х. гг. ученые задумались о способах повышения качества исследований в ИК-диапазоне. NASA приняло решение запустить космический телескоп диаметром 60 см, охлаждаемый гелиевым криостатом. Несмотря на невысокое разрешение в связи с малым диаметром телескопа, возможность охлаждения всего телескопа жидким гелием позволила бы обеспечить крайне высокую чувствительность. В 1983 г. спутник с этим телескопом на борту (IRAS — Infrared Astronomical Satellite) был запущен NASA в сотрудничестве с Нидерландами. Обращаясь на гелиосинхронной полярной орбите на высоте 900 км, IRAS выполняет картирование неба в четырех фильтрах: 12, 25, 60 и 100 мкм. Каталог IRAS покрыл 95% неба. Благодаря ему обнаружили более 200 тысяч источников, многие из которых имеют внегалактическое происхождение и обладают огромной светимостью из-за окружающих их нагретых облаков пыли. IRAS выполнял наблюдения в течение 10 месяцев и был первым как в науке, так и в технологии холодных космических телескопов.

В том же 1983 г., незадолго до запуска IRAS, Европейская южная обсерватория (ЕЮО) начала разработку проекта инфракрасной космической обсерватории (ISO). Планировалось, что ISO станет первой ИК космической обсерваторией, оснащенной трехосным телескопом с четырьмя сменными приборами. В 1995 г. ISO был запущен на орбиту с апогеем 70 тыс. км. Вначале телескоп работал в диапазоне $100 \div 200$ мкм, регистрируемом небольшой галлий-германиевой матрицей, охлаждаемой до температуры 1.8 К сверхтекучим гелием. Кроме него телескоп был оснащен небольшим монолитным светоприемником среднего ИК-диапазона. ИК-спектрограф ISO позволил обнаружить наличие воды и циклических ароматных углеводородов во всей Вселенной. Кроме того, было сделано множество других открытий.

ISO проработала более 29 месяцев. Технологическими новинками этой обсерватории были:

- прямое измерение уровня охлаждающей жидкости, позволяющее точно определить количество оставшегося гелия посредством кратковременного теплового удара и прогнозировать оставшееся время работы;
- обзор «мне повезет» на длине волны 170 мкм, производящийся во время перехода от объекта к объекту;
- функционирование ИК-спектрометра после испарения всего гелия в процессе постепенного нагревания криостата.

Параллельно с ISO NASA разрабатывало проект более крупного космического ИК-телескопа (SIRTF — Space Infrared Telescope Facility). Хотя SIRTF и являлся краеугольным камнем проекта крупнейших обсерваторий, покрывающих весь диапазон электромагнитного излучения, его реализация откладывалась в течение многих лет. Одной из причин этого была его высокая стоимость. Новые разработки позволили значительно уменьшить размер и стоимость спутника. Этими разработками были: запуск «теплого» телескопа с последующим

охлаждением его уже в космосе и выбор гелиоцентрической орбиты с отставанием от Земли, позволяющей обеспечить долговременную тепловую стабильность. В последствии данный проект был переименован в Спитцер (Spitzer) и ознаменовался запуском в космос 0.85-м телескопа в 2003 г. Благодаря использованию крупноформатных ИК-матриц Спитцер стал самым чувствительным телескопом с наиболее высоким разрешением. Этот телескоп работает в диапазоне $3 \div 180$ мкм. Благодаря 350-л емкости с жидким гелием, телескоп прослужит до конца 2009 г.

В 2006 г. Япония запустила Акари (по-японски: «свет») — 68-см телескоп с оптикой из карбида кремния, охлаждаемый жидким гелием. Телескоп движется по гелиосинхронной полярной орбите на высоте 700 км. В его задачи входит ИК-обзор неба на длинах волн до 200 мкм и отдельные наблюдения.

Все космические ИК телескопы имеют диаметр главного зеркала не более одного метра. Несмотря на замечательную чувствительность, их пространственное разрешение в далеком ИК-диапазоне сильно ограничено. Исправить это ограничение можно лишь путем увеличения диаметра телескопа. Однако, в этом случае стоимость телескопа будет чрезвычайно высокой.

ЕЮО нашла компромисс в виде 3.5-м телескопа Гершель, имеющего пятикратное преимущество по разрешению над современными космическими ИК-телескопами. Зеркало телескопа постоянно экранируется от излучения Солнца и Земли и охлаждается пассивно до температуры 80 К. Три научных инструмента, установленные на телескопе, позволяют покрыть диапазон длин волн от 60 до 600 мкм. Картирование с высоким пространственным разрешением и высокое спектральное разрешение позволят использовать этот телескоп для изучения объектов от пояса Койпера и до самых далеких галактик. Телескоп был запущен в мае 2009 г., в следующем месяце им были получены первые снимки. Телескоп расположен в точке Лагранжа L2 системы Земля — Солнце.

Совместно с запуском Гершеля, на орбиту был выведен европейский телескоп Планк, целью которого является исследование реликтового излучения. Первичное зеркало Планка имеет диаметр 1.5 м и охлаждается пассивно до 40 К. Двухступенчатый криостат охлаждает светоприемник Планка до температуры 0.1 К.

В целях увеличения разрешения ИК-телескопов NASA начало разработку 6.5-м телескопа им. Дж. Уэбба (JWST — James Webb Space Telescope). Этот телескоп станет преемником устаревшего телескопа Хаббла. Основной целью JWST будет поиск самых молодых звезд и галактик во Вселенной. Их формирование ознаменовало начало эры ионизации Вселенной. Т.к. у всех этих объектов $z \geq 7$, JWST станет полноценной ИК-обсерваторией, и, конечно, будет нуждаться в сильном охлаждении. Охлаждение самого телескопа будет пассивным, но по сравнению с Гершелем, JWST будет оснащен более надежной тепловой защитой в виде тонких экранов, натянутых на мачты. Оценочно, телескоп будет иметь температуру 45 К. Т.к. столь большое зеркало не может быть монолитным, оно будет состоять из 18 шестиугольных сегментов по 1.3 м., которые будут развернуты и собраны уже в космосе. JWST будет размещен в точке L2 системы Земля — Солнце, срок его работы оценивается десятью годами. Данный телескоп будет оснащен следующим оборудованием: [37] ИК-камерой с полем $20'' \times 20''$, работающей в диапазоне $1 \div 5$ мкм.; основанным на эталоне Фабри-Перо коронографом для диапазонов $1.5 \div 2.5$ мкм. и $3.1 \div 5.0$ мкм.; спектрографом, перекрывающим диапазон $1 \div 5$ мкм.; спектрофотометр, работающий в диапазоне $10 \div 23$ мкм. В качестве дополнительной программы планируется использовать JWST для наблюдения комет и объектов пояса Койпера.

Для изучения галактик с большими z от ИК-телескопов требуется достижение крайне

высоких разрешений. Одним из способов повышения разрешения является интерферометрия при помощи нескольких относительно небольших телескопов, разнесенных достаточно далеко друг от друга. Другой способ — интерферометрия со сверхбольшой базой — группа космических телескопов, коммутацией которых можно менять размер базы. Удачным местом для расположения ИК-телескопов может стать Луна. На ее поверхности в одном из полярных кратеров можно было бы установить вращающееся жидкостное зеркало с пассивным охлаждением.

Следует заметить, что затраты на строительство крупного ($D \sim 20$ м) наземного телескопа и большого ($D \sim 5$ м) космического телескопа примерно одинаковы. Вместе с тем, неоспоримым фактом является значительное преимущество космических телескопов над наземными. Поэтому, с уверенностью можно сказать, что будущее астрономии — за космическими обсерваториями.

3 Системы охлаждения для ИК астрофизики

Охлаждение светоприемника применяется при наблюдении в широких диапазонах длин волн [9]. Прежде всего, оно необходимо для уменьшения уровня тепловых шумов. В ИК-диапазоне требования к системам охлаждения гораздо строже, чем в видимом диапазоне: чем больше длина волны, на которую рассчитан светоприемник, тем ниже должна быть его температура. Для снижения собственного излучения светоприемника при наблюдении в дальнем ИК-диапазоне, его необходимо охладить до субкельвиновских температур. Помимо светоприемника, мощным источником шумов является сам телескоп, и его тоже необходимо охлаждать для достижения качественных наблюдений. При наблюдении с поверхности Земли или с борта самолета к источникам шумов добавляется земная атмосфера. Даже в диапазонах «инфракрасных окон» атмосферы, ее инфракрасный фон достигает довольно значительных величин и не позволяет регистрировать слабые объекты.

Итак, существует два основных источника фоновых шумов: гидроксильные эмиссионные линии земной атмосферы и чернотельное излучение самого телескопа и другого оптического оборудования. Тепловое излучение оптических систем складывается из чернотельного планковского излучения каждой поверхности для данной рабочей температуры T . Вклад каждой оптической поверхности в общий шумовой фон пропорционален ее излучательной способности, ε , которую легко получить в первом приближении из закона Кирхгофа: $\varepsilon(\lambda) = 1 - R(\lambda)$, где R — коэффициент отражения. В отличие от коэффициента отражения, являющегося мультипликативной характеристикой для системы оптических поверхностей, излучательная способность — величина аддитивная. Фон неба также играет довольно значительную роль в формировании шумов. Если, например, на длине волны 430 нм фон неба составляет примерно 24 звездную величину, то в ближнем ИК на длине волны 2.2 мкм он уже составит $m \approx 13.5$, а в среднем ИК-диапазоне на длине волны 10 мкм суммарный фон от неба и телескопа может составить $m \approx 0$!

Для упрощения охлаждения телескопов при наземных или авиационных наблюдениях можно воспользоваться и «природным» холодильником: например, в некоторых местах Антарктиды температура доходит до -80°C , в стратосфере средняя температура составляет -50°C . Кроме того, при таких температурах содержание водяного пара в воздухе значительно ниже, а при стратосферных наблюдениях и толщина атмосферы над телескопом значительно меньше, чем при наблюдении с поверхности Земли.

Космические телескопы с пассивным охлаждением также являются источниками шумов,

но их интенсивность намного ниже, чем при наземных наблюдениях. Несмотря на это, для регистрации ранних объектов с очень большими z даже космические телескопы нуждаются в активном охлаждении. Светоприемники же космических ИК-телескопов должны охлаждаться до как можно более низких (субкельвиновских) температур.

Системы субкельвиновского охлаждения являются многоступенчатыми. Так, цепь охлаждения космического телескопа Планк состоит из следующих ступеней: пассивные радиаторы, охлаждающиеся за счет излучения до температуры ~ 50 К; сорбционная водородная ступень, охлаждающаяся до 19 К; лабораторный криостат с температурой ~ 4.5 К; криостат растворения с открытым циклом (работающий на смеси ^3He и ^4He), охлаждающий светоприемник до 0.1 К.

Оптика спектрофотометра космического телескопа JWST должна будет охлаждаться до температуры ~ 6 К. Система охлаждения будет состоять из трехступенчатого предварительного холодильника (цикл Стирлинга) и охладительной ступени, работающей на эффекте Джоуля–Томсона и обеспечивающей температуру 6.2 К.

Для обеспечения субкельвиновского охлаждения наиболее популярны «однозарядные» холодильные установки. Основным требованием к таким установкам является возможность быстрой «перезарядки» во время паузы между наблюдениями. Такие установки, несмотря на свои сравнительно небольшие размеры, имеют малое время работы. Для длительных наблюдений могут использоваться, например, криостаты растворения с открытым циклом. Так, криостат телескопа Планк, способен непрерывно проработать в течение $2 \div 3$ лет. Эти криостаты имеют малую массу и не излучают электромагнитных помех. Для их работы также необходимы емкости довольно внушительных размеров с рабочим веществом.

Для более долговечной работы необходимо использовать криостаты с закрытым циклом. В таких криостатах ^3He откачивается при помощи насоса, сжижается в дополнительной холодильной ступени и подается обратно. Еще одним способом обеспечения непрерывного охлаждения является циклический адиабатный криостат размагничивания. Метод основан на эффекте выделения теплоты из парамагнитных солей при их намагничивании и последующем поглощении теплоты при их размагничивании. Это позволяет получать температуры вплоть до 0.001 К. Соль намагничивается при помощи сверхпроводящих электромагнитов в ванне из жидкого гелия; тепло, выделяющееся при намагничивании соли, отводится криостатом более высоких температур (~ 1 К); после выключения электромагнита соль размагничивается, вызывая тем самым сильное охлаждение гелия. Однако, недостатком такой системы является необходимость отключать некоторую электронику (и, прежде всего, светоприемник) во время работы магнитов.

Размеры крупных болометрических светоприемников, работающих при субкельвиновской температуре, сильно ограничены даже для наблюдений на Земле. Прежде всего, это связано с затратами времени и энергии на охлаждение, кроме того, из-за крайне низких рабочих температур, существует ограничение на материалы, используемые для переноса тепла со светоприемника к криостату. Вместе с тем, криостат космического телескопа должен обладать как можно меньшим весом. Еще одним ограничением на космические криостаты является температурная стабильность: температура светоприемника должна поддерживаться на постоянном уровне с точностью до 10 нК. Удовлетворить всем требованиям, возможно, смогут слоистые криостаты металл–диэлектрик–сверхпроводник.

4 Светоприемники и оптические системы

К астрономическим светоприемникам предъявляются довольно жесткие требования [32]. Прежде всего это касается уровня шумов, квантовой эффективности и геометрического размера светоприемника (в пикселях). Эти величины можно объединить в так называемую «астрономическую характеристику», равную произведению количества пикселей светоприемника на квадрат чувствительности. Эта характеристика пропорциональна площади неба, которую можно зарегистрировать за фиксированное время с фиксированным пределом чувствительности.

В астрономии ИК–приемники начали активно использоваться в середине 80-х гг. прошлого века. Первые матричные ИК–светоприемники имели небольшие размеры (обычно, 32×32 пикселя) и обладали высоким шумом считывания (порядка 1000 электронов). По качеству они практически не отличались от одноканальных ИК–приемников.

Основным толчком к разработке качественных ИК–приемников послужили военные заказы. И лишь сравнительно недавно стали разрабатываться ИК–приемники, разработанные специально для астрофизических измерений.

Светоприемники для ближней и средней ИК–областей регистрируют фотоны за счет той или иной формы фотопроводимости. Заряды, возникающие за счет внутреннего фотоэффекта, можно накапливать в потенциальных ямах, наподобие ПЗС–ячеек, или же сразу регистрировать и усиливать формируемый ими ток фотопроводимости. Главным недостатком подобного рода светоприемников является существование красной границы фотоэффекта — минимальной энергии фотона, который еще может разорвать валентную связь в полупроводнике. Если выразить длину волны красной границы, λ_{max} , в микронах, а энергию связи, E , — в эВ, то можно записать: $\lambda_{max} = 1.24/E$. Т.о., например, для кремния $\lambda_{max} = 1.1$ мкм. — использование его для регистрации ИК–излучения сильно ограничено.

Светоприемники могут быть также основаны на явлении внешнего фотоэффекта. В этом случае «выбивание» фотоном носителя заряда происходит на поверхности полупроводника. Преимуществом детекторов такого типа является значительно меньшая энергия красной границы, что позволяет работать им в более далеких ИК–областях. В этом случае за расширение диапазона чувствительности приходится платить значительным уменьшением квантовой эффективности, т.к. внешний фотоэффект возникает лишь на атомах примеси и у поверхности кристалла. Увеличить квантовую эффективность таких детекторов можно лишь путем увеличения концентрации атомов примеси, но при этом существует некоторый предел, после которого структура полупроводника–основы начинает разрушаться.

Так как образование свободных носителей заряда в полупроводнике возникает не только под воздействием фотонов, но и за счет тепловой энергии, для уменьшения уровня шумов светоприемник необходимо охлаждать. Причем, рабочая температура светоприемника тем меньше, чем на бóльшую длину волны он рассчитан. Примерный предел рабочей температуры светоприемника можно рассчитать по формуле $T_{max} = \frac{200}{\lambda_{max}}$, где температура измеряется в Кельвинах, а красная граница — в микронах.

За счет брауновского движения носителей заряда в полупроводнике возникает дополнительный шум. Снизить его уровень можно повышая сопротивление светоприемника. Однако, повышение сопротивления приводит и к снижению величины полезного тока. Шумы, возникающие за счет брауновского движения носителей, а также квантовых процессов (например, туннелирования), характеризуют общей величиной — темновым током.

В случае работы светоприемника по принципу накопления заряда (аналогично ПЗС), возникают проблемы, связанные с постоянной времени решетки, равной RC , где R –

сопротивление ячейки, C —ее емкость. Чем выше эта величина, тем большее время требуется для считывания сигнала с ячейки. Снижение сопротивления, как говорилось выше, приводит к возрастанию темнового тока; снижение же емкости ячейки приведет к уменьшению разрешения по амплитуде регистрируемого сигнала.

Для достижения оптимального сочетания всех параметров светоприемника, используется технология слоистых структур: каждая ячейка ИК-приемника изготавливается как последовательность слоев с различными типами проводимости и различным насыщением примесей. В результате внутри ячейки возникает контактная разность потенциалов, сильно повышающая сопротивление для паразитных токов и в то же время не препятствующая прохождению полезного сигнала. Фотоионизация происходит в тонкой поверхностной пленке n -типа. Чем меньше толщина этой пленки, тем большей будет квантовая эффективность светоприемника. Возникшая в результате фотоионизации дырка проходит сквозь обедненную носителями заряда зону под воздействием приложенного обратного электрического поля.

Первые ИК-светоприемники изготавливались из InSb с рабочей областью длин волн до 5.5 мкм. Они позволяли регистрировать ИК-излучение практически во всем диапазоне атмосферных окон. Современные светоприемники чаще изготавливают из HgCdTe . Изменяя пропорцию составных элементов таких светоприемников можно регулировать их рабочий диапазон. HgCdTe светоприемники позволяют с достаточно высокой квантовой эффективностью регистрировать ИК-излучение с длиной волны вплоть до ~ 15 мкм.

Для работы в более далеком ИК-диапазоне используются светоприемники, основанные на проводимости примесной полосы (IBC — impurity band conduction). Эти светоприемники изготавливаются, например, из таких соединений как SiGa , SiAs , SiSb , GeGa , GeB , GeSb , GaAsTe и других. Комбинации различных элементов основы IBC-светоприемников позволяют регистрировать ИК-излучение с длиной волны вплоть до 300 мкм.

IBC-светоприемник состоит из прозрачной кремниевой подложки, на которую напылены прозрачный металлический катод, легированный активный слой полупроводника, тонкий блокирующий слой и металлический анод. Блокирующий слой необходим для подавления темнового прыжкового тока, возникающего в активном слое.

Для считывания заряда с «теплых» ИК-светоприемников можно использовать ПЗС. Для регистрации же дальнего ИК-диапазона светоприемник должен быть охлажден вплоть до субкельвинских температур. ПЗС же при охлаждении ниже 70 К «замерзают» и перестают переносить заряд. Современные чувствительные ИК-светоприемники изготавливают по принципу «один пиксель — один усилитель»: каждый пиксель светоприемника оснащается встроенным полевым усилителем и ключом. Усиленный сигнал накапливается на индивидуальной интегрированной конденсаторной ячейке. При считывании сигнала происходит мультиплексирование конденсаторных ячеек, что позволяет последовательно передавать весь сигнал по небольшому количеству проводников.

Внедрение индивидуальных усилителей и емкостных ячеек вкуче с мультиплексированием открывает широкие возможности использования таких детекторов. При длительном накоплении сигнала можно, не влияя на накопленный уровень, считать промежуточное изображение (т.н. неструктивное считывание). Если после считывания закоротить конденсаторные ячейки, можно начать следующее считывание с нуля (структивное считывание). Мультиплексирование позволяет производить считывание в любой последовательности, вплоть до считывания сигнала с одного произвольного пикселя.

Для уменьшения шумов такой светоприемник требует значительной стабильности по напряжению питания в течение всего времени накопления сигнала. Последовательные неструктивные считывания также помогают уменьшить шумы: путем медианного или ариф-

метического усреднения совокупности считанных кадров можно добиться картины с практически нулевым шумом считывания (для N считываний шум уменьшается в \sqrt{N} раз).

Для длин волн больших, чем 40 нм, очень трудно найти материал для изготовления светоприемника. В основном, для дальнего ИК–диапазона используются детекторы на основе германия. Но такие светоприемники не лишены недостатков [23]:

- Большая глубина абсорбции (ввиду уменьшения концентрации примесей, выполняемого с целью уменьшения темновых токов) приводит к необходимости увеличения толщины активного слоя до $3 \div 5$ мм.
- Из-за большей длины свободного пробега носителей заряда размеры пикселя, во избежание смещения сигналов, необходимо также увеличить до $500 \div 700$ мкм. Это приводит к увеличению чувствительности к космическим частицам; увеличению шума в связи с возросшей емкостью пикселя; уменьшению квантовой эффективности в связи с уменьшением тока фотопроводимости.
- Из-за малой энергии фотонов в дальнем ИК–диапазоне такие детекторы должны работать при субкельвиновских температурах, при которых происходит «вымораживание» кремния.

Несмотря на эти недостатки, для регистрации ИК–излучения в районе 70 мкм для инструмента MIPS космического телескопа Спитцер была разработана германий–галлиевая матрица 32×32 пикселя. В электронику светоприемника были внесены необходимые изменения для быстрого восстановления заряда в случае попадания в пиксель космической частицы. Аналогичный детектор планируется использовать на ИК–телескопе Гершель.

Отличительной чертой ИК–приемников является отсутствие у них типичного для ПЗС–систем затвора. Основной сложностью является то, что затвор для ИК–приемника должен быть холодным и должен обеспечивать высокоскоростные работы для наблюдений при высоком уровне фона. В большинстве ИК–детекторов затвор реализуется электронно, посредством последовательных сигналов сброса и считывания.

4.1 КМОП–матрицы

В наше время в качестве двумерных ИК–светоприемников чаще всего применяются КМОП–матрицы, изготовленные по различным технологиям. Перечислим основные отличия КМОП от ПЗС [35]:

- Каждый пиксель сочетает в себе не только ячейку для накопления возникающих вследствие внутреннего фотоэффекта электронов, но и усилитель. С одной стороны, это приводит к тому, что коэффициент усиления матрицы меняется от пикселя к пикселю. С другой стороны, таким образом уменьшается шум считывания.
- Накопленный ПЗС ячейкой заряд в процессе считывания должен пройти через несколько таких же ячеек, в то время как сигнал с КМОП ячейки выходит напрямую (посредством мультиплексирования выходов). В результате в КМОП–матрицах отсутствует понятие шума переноса заряда.
- КМОП–матрица позволяет считывать сигнал с ячеек в произвольном порядке, что недоступно ПЗС–матрицам.

Для обеспечения работы КМОП–матрицы необходим следующий минимальный набор электронных компонент:

- генератор заряда нулевого смещения (bias), необходимого для выведения матрицы на линейный участок чувствительности;

- вертикальный и горизонтальный сканеры, позволяющие активировать для считывания заданную ячейку матрицы;
- таймер, генерирующий управляющие сигналы;
- при необходимости: буфер для накопления считанного сигнала;
- при необходимости: оконечный усилитель;
- при необходимости: аналогово–цифровой преобразователь и контроллер шины передачи цифровых данных.

4.1.1 HgCdTe детекторы

Научное объединение Рокуелл производит различные типы ИК–светоприемников. С 1987 г. сменилось уже несколько поколений светоприемников этой фирмы. Последним на 2006 г. поколением этих детекторов был HAWAII-6RG — матрица $6k \times 6k$ пикселей с размером пикселя 10 мкм. Название HAWAII является аббревиатурой (HgCdTe Astronomical Wide Area Infrared Imager).

Достоинством ртуть–кадмий–теллуровой основы является возможность изменения красной границы чувствительности светоприемника посредством изменения концентрации кадмия в основе.

Существует две методики получения ртуть–кадмий–теллуровых матриц. По первой методике эти кристаллы выращиваются на сапфировой подложке, по второй — на кадмий–цинк–теллуровой матрице. Достоинством первого метода является относительно низкая стоимость. Второй же метод позволяет получить более эффективные светоприемники [35].

Контроль толщин осаждаемых пленок осуществляется посредством отражательной эллипсометрии (определение толщины слоя по интенсивности и степени поляризации отраженного от него света). Так как HgCdTe основа хорошо поглощает излучение, нет необходимости напылять на поверхность матрицы толстые слои основы. Обычно ограничиваются толщиной слоя, немногим превышающим красную границу чувствительности матрицы. Вблизи красной границы интенсивность поглощения излучения значительно снижается, поэтому обычно красную границу определяют как длину волны, на которой квантовая эффективность светоприемника снижается до 50% (хотя эта величина и не совпадает с границей чувствительности матрицы, она является достаточно объективной характеристикой светоприемника).

Цифра в названии светоприемника означает размер матрицы в килопикселях. Светоприемники HAWAII последних поколений имеют следующие характеристики [39]:

- Эталонные пиксели (такие светоприемники характеризуются буквой R в названии) — четыре крайних ряда пикселей с каждого края матрицы. Эталонные пиксели отражают флуктуации заряда смещения (bias) в течение времени экспозиции, что позволяет более точно установить нуль–пункт интенсивности изображений.
- Окно гидирования (буква G в названии) позволяет получать данные, необходимые для стабилизации положения телескопа во время наблюдений.
- Низкие шум считывания и темновой ток (около 6 электронов за 1000 с экспозиции).
- Низкая потребляемая мощность (менее 1 мВт).
- Практически полное отсутствие теплового шума усилителя.

4.1.2 ИВС–матрицы

Светоприемники этого типа лучше всего подходят для регистрации ИК–излучения в довольно широкой полосе [32]. Собственное поглощение ИК–излучения арсенидом кремния (SiAs)

невелико вплоть до $\lambda = 5 \text{ мкм}$. В ИВС–матрицах активный слой имеет значительную толщину и высокий уровень легирования. Предельно допустимой величиной примеси арсения является 10^{18} атомов на кубический сантиметр активного слоя. Толщина активного слоя определяется концентрацией дефектов. Кроме того, толщина выбирается так, чтобы напряжение смещения (bias) не вызывало лавинообразного образования паразитных носителей заряда. Например, предельная концентрация дефектов составляет $1.44 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для слоя толщиной 45 мкм и $1.85 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ для слоя толщиной 35 мкм.

Считывание сигнала с таких светоприемников выполняется аналогично механизму считывания HgCdTe–светоприемников.

Однако, при очень низких температурах в ИВС–матрицах возникает «вымораживание» носителей заряда, что приводит к нестабильности электронных цепей, возрастанию шума и гистерезису сигнала. Приложенное к ячейкам светоприемника напряжение смещения должно компенсироваться тепловыми свободными носителями. Многие из перечисленных последствий могут быть смягчены посредством использования в качестве подложки матрицы сильно легированного полупроводника с тонкой прослойкой из чистого кремния, выполняющей роль изолятора. Такая сильно легированная подложка повышает концентрацию свободных носителей заряда, что делает светоприемник более стабильным при низких температурах.

4.1.3 Светоприемники на квантовых ямах

Светоприемники на квантовых ямах (QWIP — quantum well infrared photodetector) основаны на эффекте фотовозбуждения электронов и их переходе между основным состоянием и множеством квазистабильных возбужденных состояний (квантовых ям) [20]. Множественные квантовые ямы создаются посредством тонкопленочных технологий из полупроводниковых материалов. Комбинация различных материалов приводит к возникновению множества стабильных энергетических уровней, играющих роль набора потенциальных ям с возрастающими потенциалами.

Эффективность QWIP складывается из квантовой эффективности (которая обычно имеет значение порядка $10 \div 30\%$ и пропорциональна концентрации примесей) и коэффициента усиления за счет фотопроводимости (он определяется уровнем возбужденного состояния носителей заряда и количеством потенциальных ям между связанным и квазисвязанным уровнями). Для QWIP с 50 потенциальными ямами коэффициент усиления имеет значение от 10% до 50%. Несмотря на сравнительно небольшое значение итоговой квантовой эффективности QWIP, эти светоприемники имеют значительные величины отношения сигнал/шум, т.к. темновой ток и прочие шумы уменьшаются по тем же причинам, которые вызывают некоторое уменьшение уровня сигнала.

Спектральная чувствительность QWIP определяется разностью уровней между основным и возбужденным состояниями. Из-за явления резонансного поглощения, чувствительность QWIP имеет вид полосы ($\Delta\lambda/\lambda \sim 10\%$). Ширину этой полосы можно увеличить посредством внедрения дополнительных энергетических уровней между квантовыми ямами QWIP.

Квантовую эффективность QWIP нельзя значительно увеличить посредством увеличения концентрации носителей заряда, т.к. это приводит к значительному возрастанию темнового тока — основного источника шумов такого светоприемника. Однако, можно добиться довольно высокой концентрации носителей заряда в случае, если QWIP будет работать при низких температурах, так как термоионная эмиссия — один из источников темнового тока — экспоненциально убывает с убыванием температуры. Значительно понизить величину темнового

тока может внедрение в энергетическую структуру QWIP ступенчатых потенциальных барьеров, которые туннелируются темновыми электронами намного хуже, чем прямоугольные барьеры. При рабочей температуре 25 К темновой ток QWIP со ступенчатыми барьерами составляет порядка 10 электронов в секунду для длины волны 15 мкм.

Для 5-м телескопа Гале (Hale) Паломарской обсерватории была разработана камера на основе двух матриц QWIP, позволяющая одновременно регистрировать изображение с полем $2' \times 2'$ на длинах волн 4.7, 8.5 и 12.5 мкм. Рабочая температура этих светоприемников составляет 30 К. Структура этих QWIP включает 30 квантовых ям и ступенчатые барьеры. Каждая матрица имеет размер 256×256 пикселей.

4.2 Болометры

Принцип работы болометров отличается от описанных выше светоприемников. Болометры измеряют тепловую энергию, образующуюся в результате поглощения фотонов. Для уменьшения шумов, возникающих в результате тепловых флуктуаций, рабочая температура болометра должна быть как можно более низкой. Уровень тепловых шумов болометра пропорционален $T^2 \div T^{2.5}$. Таким образом, болометры должны работать при субкельвиновских температурах.

Основной сложностью при построении болометрических матриц является необходимость сочетать в одном пикселе электронный термометр, чья температура должна поддерживаться на строго заданном уровне, и усилитель, являющийся паразитным источником тепла. Кроме того, как уже говорилось выше, субкельвиновские температуры приводят к эффекту «замораживания» свободных носителей заряда в полупроводниках.

Термометры для болометрических матриц обычно работают в режиме сверхпроводимости (собственно термометрическое тело обладает небольшим сопротивлением, его контакты являются сверхпроводниками). Кроме того, можно использовать комбинацию сверхпроводников с джозефсоновскими переходами в качестве предварительных усилителей.

Для регистрации излучения в субмиллиметровом и миллиметровом диапазоне каждая ячейка приемника может сочетать в себе болометр и микроскопическую антенну. Благодаря диаграмме направленности антенны, такой приемник одновременно играет роль анализатора поляризации.

В. Реверет и др. [1] предложили новый тип ИК–светоприемника, объединяющий в себе принципы ПЗС–матрицы и болометра для наблюдений на субмиллиметровом телескопе имени Гершеля. Каждый пиксель светоприемника содержит на поверхности два полупроводниковых термометра (Si–P–B), работающих при температуре 300 мК в режиме прыжковой проводимости. Для улучшения поглощения каждый пиксель выполнен в виде ячейки глубиной $\lambda/4$. Дно ячейки представляет собой кремниевую подложку с нанесенными на нее золотыми отражателями. Верхний поглощающий слой отделен от подложки индиевыми опорами. Сигнал с термометров посредством сверхпроводников передается на КМОП–транзистор, установленный под поверхностью светоприемника и работающий при температуре 2 К.

Таким образом, для повышения (теоретически, до 100%) эффективности болометра, используется эффект интерференции. Полоса пропускания такого болометра недостаточно широка, поэтому следующее поколение ИК–болометров функционирует за счет эффекта многослойной интерференции: перед ячейкой на некотором расстоянии от нее напыляется кремниевая пленка. Например, при нанесении кремниевой пленки толщиной 59 мкм на расстоянии 175 мкм от поверхности ячейки, болометр имеет три полосы чувствительности — 200, 350 и 450 мкм.

4.3 Оптические материалы

Появление оптических квантовых генераторов привело к возникновению новой науки — фотоники. Коренные области исследований фотоники включают волоконную и интегральную оптику, в том числе нелинейную оптику, физику и технологию полупроводниковых соединений, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронные устройства, высокоскоростные электронные устройства. В последнее десятилетие астрономия уверенно идет в ногу с фотоникой. Одним из наиболее распространенных примеров является использование оптических волокон для переброса излучения в видимом диапазоне к оптике спектрографов. Одномодовые оптические волокна, благодаря их свойствам пространственной фильтрации, нашли применение во многих астрофизических приборах, особенно полезны их фильтрующие свойства в интерферометрии. Аналогично в качестве модальных фильтров в ИК-диапазоне используются пустотелые волноводы [6].

Одним из основных достоинств разработок фотоники является компактность. Такие оптические компоненты позволяют реализовать каналы переброса и детектирования излучения, имеющие значительное преимущество над громоздкими классическими оптическими скамьями. Столь широкое внедрение фотоники в астрономию породило неологизм *астрофотоника* [19].

Учитывая то, что большинство используемых в оптике видимого диапазона материалов в той или иной степени непрозрачны для ИК-излучения, возникает необходимость исследования и внедрения новых ИК-материалов. Классическим материалом — своего рода заменителем стекла в видимом диапазоне — в ИК-диапазоне стал кремний. Кроме того, в ИК-диапазоне используются стекла из халькогенидов (соединения элементов шестой группы таблицы Менделеева — кислорода, серы, селена, теллура и полония — с металлами). Большинство этих соединений прозрачны для излучения с длинами волн вплоть до $11 \div 12$ мкм. Этот диапазон можно расширить до $18 \div 20$ мкм посредством изготовления композитных стекол. На оптические свойства халькогенидов могут влиять следующие внешние факторы:

- механические нагрузки (ИК-материалы обычно обладают хрупкостью и высокой чувствительностью к напряжениям и ударам);
- химический состав окружающей среды (некоторые материалы могут абсорбировать водяной пар, уменьшающий их прозрачность);
- температурный режим (многие материалы имеют строгие температурные режимы работы, кроме того, их качество может ухудшиться при резкой смене температуры).

ИК-материалы помимо кристаллической формы могут быть аморфными. Например, аморфными являются многие халькогениды. Типичными халькогенидами являются As_2Se_3 и As_2S_3 , имеющие хорошую прозрачность до 16 мкм. Композиты этих халькогенидов с германием или теллуrom прозрачны вплоть до 20 мкм. Также прозрачны в диапазоне до 20 мкм стекла из галогенидов серебра. Однако, галогениды серебра при контакте с металлами страдают от коррозии, кроме того, они обладают фоточувствительностью, что накладывает дополнительные ограничения на области их применения.

В качестве волноводов в ИК-диапазоне, как уже говорилось выше, наиболее распространены пустотелые волокна. В них ИК-излучение распространяется в почти идеальной среде с низким поглощением (воздух или вакуум) за счет зеркального отражения от металлического слоя, покрывающего внутренние поверхности волновода. Можно выделить два основных класса пустотелых волноводов: металлические трубки и слоистые структуры из диэлектрических материалов с нанесенным на внутреннюю поверхность металлическим покрытием.

Пустотелые волноводы, в отличие от обычных оптических волокон, не обладают зависи-

мостью пропускания излучения от угла падения входящего пучка. Пустотелые волноводы не лишены и недостатков: в них очень сложно организовать одномодовость. Внутренний диаметр одномодового волновода не должен превышать двух длин волн, т.е. в среднем ИК–диапазоне это порядка 20 мкм. При больших же толщинах в волноводе сильно возрастают потери излучения. Одномодовые волноводы имеют наилучшие характеристики благодаря малому затуханию, минимальной величине модовой дисперсии, широкой полосе пропускания.

Одной из разработок фотоники являются кристаллические волокна, изготовленные из диэлектрических структур с периодически изменяющимся вдоль радиуса волокна коэффициентом преломления. Структурами с более низким коэффициентом преломления могут быть как диэлектрические трубки, так и пустоты. Количество и расположение таких трубок с низким коэффициентом преломления определяют волновые свойства волокна. Одномодовые волноводы для ИК–диапазона проще изготовить по такой технологии. Стоимость таких волокон довольно высока, поэтому в качестве оптимальных решений зачастую изготавливают оптические волокна для ИК–диапазона из халькогенидов.

5 Методы исследований в астрофизике ИК–диапазона

5.1 Фотометрия

5.1.1 Фотометрические системы

Первые письменные источники, которые можно отнести к фотометрическим каталогам, относятся ко времени Древней Греции. Около 129 г. до н.э. был составлен каталог Гиппарха, в котором описывались не только координаты восьми с половиной сот звезд, но и их яркость с градациями «очень яркая», «яркая», «слабая» [25]. В «Алмагесте» Клавдия Птолемея (примерно 137 г. до н.э.) содержатся сведения о координатах и яркостях 1028 звезд. Именно Птолемей ввел термин «звездная величина» и шкалы из шести величин. Его шкала была основана на видимости звезд сразу после наступления сумерек. Разделив интервал от появления самых ярких звезд (первой величины) до окончания сумерек на шесть равных частей, можно, по моменту появления звезды на фоне сумеречного неба, судить о ее звездной величине. Интересно, что шкала звездных величин Птолемея практически не изменилась на протяжении веков, и используется в наше время почти в первоначальном виде.

После появления телескопов Уильям Гершель около 1870 г. разработал метод, позволяющий более точно визуально определять звездные величины объектов. Погрешность метода Гершеля не превышала 0.1^m .

Первые фотометры позволили улучшить качество определения звездной величины объекта. Появилась возможность введения более точных дробных значений звездной величины. Для согласования результатов измерения различных наблюдателей необходимо было ввести единую абсолютную фотометрическую шкалу. В 1856 г. Норманом Погсоном (Norman Pogson) было предложено значение величины, на которую отличаются интенсивности излучения от двух звезд с разностью звездных величин в 1^m : $R = I_m/I_{m+1} = 2.512$. В то время еще не было возможности установить абсолютную фотометрическую шкалу. Для сравнения величин двух звезд пользовались упрощенной формулой: $m_1 - m_2 = -2.5 \cdot \lg(I_1/I_2)$ (т.е. отношение интенсивностей излучения двух звезд с разницей яркостей в 5^m считалось равным 100).

Появление фотографической фотометрии позволило значительно ускорить процесс составления звездных каталогов: по фотопластинкам можно было быстро и надежно измерить яркости звезд и их координаты. Благодаря фотографии появилась новая фотометрическая система — фотографическая, — основанная на группе стандартных звезд («Северная полярная последовательность», North Polar Sequence). Звезды последовательности были выбраны так, чтобы при составлении обзоров звездного неба посредством широкоугольных камер в каждый кадр попадала по крайней мере одна стандартная звезда.

В 1913 г. фотографическая и визуальная фотометрические системы были стандартизованы путем определения новых стандартных звезд класса А0, имеющих равные фотографические и визуальные звездные величины в диапазоне $5.5^m \div 6.5^m$.

Ячейки, основанные на эффекте фотопроводимости, позволили поднять точность определения яркостей звезд до тысячных долей звездной величины. При помощи этих ячеек были получены первые кривые блеска переменных звезд. Фотоумножители позволили еще больше повысить точность фотометрии и расширить ее возможности на более слабые объекты.

Электронная фотометрия позволила выделить в спектре звезд широкие фотометрические полосы. Появились первые полосовые фотометрические системы. Так как первоначально в качестве фильтров использовались окрашенные стекла, соответствующие фотометрические диапазоны длин волн получили свое название от цвета таких стекол. Например, фотометрическая система UVBGRi Стеббинса и Уитфорда (Stebbins & Whitford, 1943), состояла из следующих диапазонов: U ($\lambda_c = 3459\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 435\text{\AA}$), V ($\lambda_c = 4200\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 745\text{\AA}$), B ($\lambda_c = 4797\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 1092\text{\AA}$), G ($\lambda_c = 5558\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 1081\text{\AA}$), R ($\lambda_c = 6954\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 1150\text{\AA}$), I ($\lambda_c = 10136\text{\AA}$, $\Delta\lambda = 1917\text{\AA}$), где λ_c — центральная длина волны диапазона, $\Delta\lambda$ — ширина полосы на половине высоты.

Более употребительная фотометрическая система UBVRI Джонсона (Johnson, 1965) состояла из полос U (ультрафиолет, 3518/619, далее будем записывать параметры фильтров в виде $\lambda_c/\Delta\lambda$), B (синий, 4407/891), V (зеленый, 5479/818), R (красный, 6846/1943), I (инфракрасный, 8640/2176). Система UBVRI была дополнена для ИК-фотометрии полосами J (1.25/0.30 мкм — длины волн ИК-диапазона, в отличие от видимого, будем записывать в микрометрах, а не ангстремах), K (2.20/0.54), L' (3.57/0.82), L" (3.41/0.66), M (5.00/1.06), N (10.38/4.19). Фотометрические измерения в УФ-диапазоне проблематичны из-за поглощения этого диапазона земной атмосферой и непрозрачности для него оптических стекол.

Появление ПЗС-матриц и других типов двумерных светоприемников расширило возможности астрофизических исследований и, прежде всего, фотометрии. Специально разработанные ИК-светоприемники позволили расширить фотометрический диапазон до сотен микрометров. Интерференционные светофильтры позволили произвольно выбирать фотометрические диапазоны. Индивидуальные особенности отдельных ИК-светоприемников также накладывали ограничения на принимаемый диапазон длин волн. Это привело к появлению новых ИК-фотометрических систем. Например, система TIRCAM состоит из полос $8.4 \div 9.2$, $9.3 \div 10.3$, $9.8 \div 10.8$, $11.1 \div 12.3$, $11.9 \div 13.1$. МКО-NIR использует полосы $1.17 \div 1.33$, $1.49 \div 1.78$, $1.95 \div 2.29$, $1.99 \div 2.31$, $2.03 \div 2.37$, $3.42 \div 4.12$, $4.57 \div 4.79$. Камера IRAC космического телескопа Спитцер работает в полосах с λ_c 3.6, 4.5, 5.8 и 8.0 мкм. ИК-камеры ближнего и дальнего диапазонов также работают в собственных фотометрических полосах.

5.1.2 ИК-фильтры

Для наблюдений в ИК-диапазоне зачастую используются такие же технологии изготовления фильтров, как и для видимой области. Например, в качестве широкополосных фильтров

могут быть использованы абсорбционные ячейки или фильтры многократного отражения. Для фильтрации узких полос ИК–диапазона могут использоваться эталоны Фабри–Перо (ЭФП). При изготовлении отражающих поверхностей ЭФП в виде металлической сетки можно сформировать узкополосный ИК–фильтр. Ширина полосы пропускания и средняя длина волны такого фильтра являются функцией порядка интерференции и шага сетки. Например, ЭФП с шагом сетки 59 штрихов на миллиметр работает в третьем порядке интерференции как фильтр с $\lambda_c = 33$ мкм. и шириной полосы пропускания $\Delta\lambda = 0.72$ мкм. с пропусканием 0.78 [56]. В дальнем ИК–диапазоне пропускание ЭФП сильно уменьшается. ЭФП с шагом сетки 39 штрихов на миллиметр на длине волны $\lambda_c = 337$ мкм. с $\Delta\lambda = 1.12$ мкм. во втором интерференционном порядке имеет пропускание всего лишь 0.10. Несмотря на этот недостаток, сканирующие спектрометры на ЭФП значительно превосходят Фурье–спектрометры за счет выигрыша в отношении сигнал/шум. Работая в нескольких интерференционных порядках ЭФП может одновременно разрешить спектральные линии на разных длинах волн в одном световом пучке [5].

Производство интерференционных фильтров для дальнего ИК–диапазона по классическим технологиям, используя многослойные диэлектрические покрытия, затруднено в связи со сложностью выбора материалов для таких покрытий. Между тем, для далекого инфракрасного диапазона можно изготавливать отражающие интерференционные фильтры с покрытием из металлической сетки. В этом диапазоне наиболее распространенными являются интерференционные сеточные фильтры.

Использование интерференционных фильтров удобно не только их лучшими, по сравнению с абсорбционными фильтрами, характеристиками, но и возможностью «перестройки» фильтра. В зависимости от угла падения светового пучка интерференционный фильтр будет выделять разные спектральные области. Центральная длина волны фильтра имеет следующую зависимость от угла падения [52]:

$$\lambda(\theta) \simeq \lambda(0) \cdot \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_{eff}^2}},$$

где n_{eff} — эффективный показатель преломления фильтра (для большинства интерференционных ИК–фильтров $n_{eff} \simeq 2$).

Сеточные ЭФП также обладают возможностью настройки. Резонансная длина волны таких фильтров имеет следующую зависимость от угла падения, α , [14]:

$$\lambda_0(\alpha) = \lambda_0(1 + \sin \alpha).$$

Основная резонансная длина волны λ_0 таких фильтров зависит только от шага металлической сетки фильтра, g . Все фильтры с одинаковым материалом покрытия характеризуются одинаковой зависимостью коэффициентов отражения и пропускания от отношения g/λ . Если металлическое покрытие имеет вид сетки с отверстиями (индуктивная сетка), ее коэффициент отражения, R , падает с ростом g/λ , а коэффициент пропускания, T , — возрастает до определенного значения g/λ , соответствующего резонансной длине волны, а затем спадает. Характеристики фильтров с емкостными сетками, рисунок которых является инверсией индуктивных, ведут себя противоположно: R возрастает с ростом g/λ , а T убывает вплоть до резонансной длины волны, а затем опять возрастает. Минимум коэффициента пропускания емкостных сеток и максимум коэффициента пропускания индуктивных сеток расположен вблизи $\lambda_0 \simeq g$. Резонансная длина волны у емкостных сеток зависит еще и от материала основы фильтра. Эта зависимость наиболее выражена для $g > 200$ мкм. Ширина полосы

пропускания сеточных фильтров зависит от расстояния между элементами сетки, a . Комбинируя сеточные ЭФП с разными резонансными длинами волн, можно получить качественный узкополосный фильтр для дальнего ИК-диапазона.

При проектировании ИК-фильтров необходимо учитывать поглощение инфракрасного излучения земной атмосферой. Например, для ИК-камеры телескопа Мауна Кеа разработаны фильтры ближнего ИК-диапазона с полосами пропускания, совпадающими с наиболее широкими окнами прозрачности земной атмосферы [36]. В табл. 1 приведены характеристики наиболее широких «атмосферных окон».

λ_c , мкм	Обозначение	FWHM ($\Delta\lambda$, мкм)
1.25	J	0.30
1.65	H	0.35
2.2	K	0.4
3.5	L	1.0
4.8	M	0.6
10.6	N	5.0
21.0	Q	11.0

Таблица 1: Окна пропускания земной атмосферы в ИК-диапазоне [23]

Интерференционные фильтры находят свое применение и в спектрофотометрии. Точность результата спектрофотометрических измерений очень сильно зависит от качества определения уровня непрерывного спектра. На определение положения континуума влияет не только уровень шума, но и цветные градиенты. Применение в этом случае узкополосных интерференционных фильтров с полосой пропускания, охватывающей участок континуума как можно ближе к регистрируемой спектральной линии, значительно облегчает задачу точного определения уровня непрерывного спектра [11].

5.1.3 Фотометры

Для группового исследования и классификации астрофизических объектов наиболее подходящей методикой являются фотометрические обзоры в нескольких полосах. В связи с тем, что ИК-светоприемники развивались медленнее оптических, ИК-обзоры по широте охвата значительно уступают обзорам неба в оптическом диапазоне. Выполнение ИК-обзоров требует использования телескопов как можно больших размеров, чтобы достичь приемлемого уровня сигнал/шум.

Так как очень часто ИК-камеры используются для получения изображений далеких галактик, встает вопрос применения спекл-интерферометрии к ИК-диапазону. Здесь могут использоваться такие алгоритмы, как анализ спектра мощности полученного сигнала, биспектральный анализ (дающий наилучшие результаты), анализ Кнокса-Томпсона, фазоградиентный анализ, анализ сдвигов спеклограмм [10]. Однако, значительные уровни шумов не позволяют использовать наземную спекл-интерферометрию в ИК-диапазоне так же широко, как в видимом.

К 1994 г. технология производства ИК-приемников достигла таких успехов, что единственного существующего обзора неба в ближнем ИК-диапазоне, TMS5, стало не хватать для интерпретации результатов наблюдения отдельных объектов. Возникла необходимость

в составлении нового, более глубокого обзора. Новый обзор, получивший название двухмикронного обзора всего неба (Two Micron All Sky Survey — 2MASS), был разработан в университете Массачуссеттса (ныне — университет Вирджинии). Обзор осуществлялся при помощи двух 1.3 м. телескопа, один из которых расположен в Аризоне (гора Хопкинс), второй — в Чили (Сьерро Тололо). Северный обзор начался в 1997 г., а южный — в 1998 г. Камеры 2MASS включали три HgCdTe ИК-матрицы 256×256 пикселей, каждая из которых регистрировала свой диапазон (J—1.25 мкм, H—1.65 мкм и Ks—2.17 мкм). Для отношения сигнал/шум предельные звездные величины обзора лежали от 14.3^m для Ks до 15.8^m для J. Обзор был закончен в 2001 г., а каталог 2MASS был опубликован в 2003 г.

В 2005 г. начался более глубокий ИК-обзор — UKIDSS (UKIRT Infrared Deep Sky Survey). Этот обзор расширит диапазон длин волн 2MASS и будет по крайней мере на три звездных величины глубже. Обзор производится при помощи камеры WFCAM, светоприемник которой покрывает площадку в 0.21 кв. градусов с размером пикселя $0.4''$. Первые публикации материалов будущего каталога (примерно одна пятая планируемого объема) состоялись в январе 2008 г. Обзорным инструментом следующего поколения должна стать VISTA, основанная на 4-м. телескопе, в которой для приема ИК-излучения используется массив из 16 HgCdTe светоприемников 2048×2048 пикселей.

Для создания ИК-обзора на 2.5-м британском телескопе имени Исаака Ньютона (INT, Канарские острова) использовалась ИК-камера CIRSI [41]. CIRSI работал в первичном фокусе телескопа INT, принимая излучение мозаикой из четырех светоприемников HAWAII. Сессия из четырех последовательных наблюдений (при поочередном сдвиге массива светоприемников) позволяла получить изображение поля $29.6'' \times 29.6''$. Данный обзор позволил исследовать некоторых кандидатов в квазары и выявить не только новые квазары, но и квазары с отсутствием УФ-избытка.

На таком же массиве светоприемников работает широкоугольная ИК-камера Лас Кампанаса [44]. Камера и светоприемник размещены в отдельных дьюарах, причем рабочая температура камеры довольно высока (-40°C , в то время как рабочая температура светоприемника составляет 44 К). Такое разделение температурных режимов камеры и светоприемника позволяет экономить жидкий азот, используя для охлаждения камеры компрессор промышленного холодильника.

Для Большого бинокулярного телескопа (LBT, 2 зеркала по 8.2 м, — университет Аризоны, совместный итальяно-американо-германский телескоп) и Национального телескопа Галилея (TNG, зеркало 3.58 м, — остров Св. Мигеля де Ла Пальма — итальяно-испанский телескоп) разработана широкоугольная камера WIDE [29]. Для уменьшения шумов и упрощения конструкции данная камера разработана для установки в первичном фокусе телескопа LBT. Масштаб в первичном фокусе LBT позволяет ограничиться одним ИК-светоприемником. Для получения такого же поля на телескопе TNG, необходимо использовать матрицу 4×4 светоприемника. Оптика обеих камер изготовлена из кристаллов фторида бария, фторида кальция и расплавленного кремния и помещена в криостат. Оптическая схема камер разработана таким образом, чтобы свести к минимуму влияние небольших разъюстировок первичной линзы камеры. Благодаря этому первичная линза играет также роль входного окна криостата, не нуждаясь в дополнительных механических монтировках. Стоимость WIDE сравнима со стоимостью используемого в нем светоприемника — HAWAII-2 2048×2048 пикселей.

Помимо ИК-светоприемников, разрабатываемых для оптических телескопов, существуют проекты систем, узко специализирующихся на ИК-диапазоне. Одним из таких проектов является VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy) — 4-м телескоп с большим

полем, специально разработанный для обзоров неба в ИК– и видимом диапазонах. VISTA расположен к северо–востоку от телескопа VLT на высоте около 1500 м [50]. Для этого телескопа в 2004–2006 гг. была разработана ИК–камера, содержащая 16 светоприемников HgCdTe 2048×2048 пикселей [51]. Для охлаждения камеры разработана автоматическая система, в которой жидкий азот из двух 120-л дьюаров закачивается в восемь дьюаров камеры под давлением 4 атм., что позволяет снизить время полного охлаждения камеры с 8 до 3 дней. Для предотвращения поступления тепловой энергии и рассеянного ИК–излучения в камеру в ИК–фотометрах обычно используется т.н. «cold stop»: в фокальной плоскости телескопа размещается охлаждаемая прозрачная для ИК–излучения пластина с диафрагмой. Однако, большой размер камеры VISTA и ее поле зрения не позволили использовать дополнительную оптику для организации подобного барьера, на ее входе установлен конусовидный набор из семи охлаждаемых диафрагм. Массив светоприемников закрепляется на молибденовой пластине. Несмотря на столь значительное количество светоприемников, располагающихся в фокальной плоскости камеры, полное считывание информации занимает всего 1 с, что обеспечивается 256 параллельными каналами считывания. Для коррекции волнового фронта и положения объекта в камере используется три ПЗС–матрицы, одна из которых расположена в фокальной плоскости камеры, две других формируют изображение объекта до и после фокуса.

5.2 Спектроскопия

ИК–спектроскопия — относительно новое течение в наблюдательной астрономии с большим научным потенциалом. Благодаря тому, что межзвездное поглощение сильно уменьшается в сторону длинноволнового излучения, в инфракрасном диапазоне можно получить данные об объектах, скрытых от нас в видимом диапазоне за толщей пыли и газа. Кроме того, изучение галактик с большими z может производиться только в ИК–диапазоне из-за сдвига в него основных характерных спектральных линий.

Существующие ИК–спектрографы больших телескопов обладают множеством неразрешимых ограничений. Одним из них является малая ширина участка спектра, покрываемого за одну экспозицию. В табл. 2 перечислены известные ИК–спектрографы высокого разрешения [31].

Спектрограф	Телескоп	R_{max}	Щель для R_{max}	Ширина спектра
CRIRES	VLT (8m)+AO	10^5	0.2''	$\lambda/70$
PHOENIX	Gemini (8m)	$8 \cdot 10^4$	0.2''	$\lambda/200$
GIANO	TNG (3.5m)	$5 \cdot 10^4$	0.5''	$\lambda/1.3$
NIRSPEC	Keck (10m)	$3 \cdot 10^4$	0.3''	$\lambda/10$
CSHELL	IRTF (3m)	$3 \cdot 10^4$	0.5''	$\lambda/240$

Таблица 2: ИК–спектрографы высокого разрешения

В следующих астрофизических задачах высокое разрешение и ширина спектра в ИК–диапазоне являются критическими:

- Поиск внесолнечных планет у карликов и субкарликов. Так как массы таких звезд сравнительно малы, по сдвигам в их спектре легче обнаружить наличие у них планет. Такие звезды очень слабо излучают в видимом диапазоне, имея максимум излучения

в красном или даже ближнем инфракрасном диапазоне. Спектроскопия высокого разрешения в ближнем ИК поможет обнаружить планеты с массами порядка нескольких масс Земли у звезд с массами $0.1 \div 0.2 M_{\odot}$. Для измерения изменений лучевой скорости такой звезды с точностью выше 1 м/с , необходимо широкое покрытие спектра, высокое разрешение спектрографа и высокая его стабильность.

- Наблюдение внутренней части Галактики сильно затруднено в оптическом диапазоне из-за обилия газа и пыли. Однако, в ИК-диапазоне эта пыль почти прозрачна, и при помощи ИК-спектрографов высокого разрешения можно, например, изучать химический состав и кинематику звезд с высокой металличностью.
- Одной из важных задач современной астрофизики является изучение эволюции металличности галактик на больших z . Естественно, из-за больших z такие галактики в видимом диапазоне изучать не удастся.

Для телескопа TNG в 2000 г был разработан ИК-спектрометр NICS [30] (Near Infrared Camera Spectrometer), диспергирующим элементом которого является призма Амичи, а в качестве камеры используется описанная выше WIDE. При использовании данного инструмента наблюдатели столкнулись со следующими проблемами.

- Качество оптики камеры, предназначенной для широкоугольных наблюдений. При охлаждении камеры из-за незначительных подвижек оптики возникает разъюстировка, приводящая к смещению спектра на несколько пикселей в углах светоприемника. Для устранения этого эффекта в NICS применяется редуктор фокуса, уменьшающий смещение до долей пикселя.
- Контроллер светоприемника. При наблюдении с короткими экспозициями электроника контроллера работает нестабильно, что приводит к зависанию контроллера и необходимости его ручного перезапуска или же несогласованной работе (вплоть до отключения) отдельных квадрантов светоприемника.
- Хрупкость механики спектрометра, зачастую заклинивающей во время перемещения оптических элементов, что приводит к разъюстировке спектрометра.

Однако, несмотря на перечисленные проблемы, NICS показывает хорошие результаты в ИК-спектроскопии на телескопе TNG, изначально не предназначенном для наблюдений в ИК-диапазоне. При измерениях на этом приборе фон неба колеблется от 12.8^m (в полосе K) до 15.6^m (в полосе J), предельная чувствительность при часовых экспозициях колеблется от 20.3^m (в полосе K) до 21.9^m (в полосе J).

Спектрометр NICS используется при наблюдениях транснептуновых объектов, коричневых карликов и квазаров с большими Z .

Еще одним ИК-спектрографом телескопа TNG является GIANO [43] (итальянское имя Януса двуликого). GIANO — эшелле спектрограф высокого разрешения ($R = 46000$ при дискретизации на два пикселя), практически полностью перекрывающий диапазон $\lambda = 0.95 \div 2.5 \text{ мкм}$. Кроме того, спектрограф может работать в длинноцелевом режиме с большим пропусканием со средним разрешением $R \simeq 400$ и максимальным $R_{max} \simeq 1000$, перекрывая диапазон $\lambda = 0.75 \div 2.5 \text{ мкм}$. В спектрографе предусмотрен режим поляриметрии как в режиме высокого, так и низкого разрешения.

GIANO содержит довольно значительное количество оптических элементов: пять «теплых» линз, три «холодные» двухпроходные призмы, пять «теплых» зеркал и семь «холодных» зеркал, из которых четыре — двухпроходные. Таким образом, в режиме высокого разрешения полная оптическая эффективность прибора составляет порядка 39%, а в режиме низкого разрешения — 60%. В качестве светоприемника в данном инструменте используется матрица HAWAII-2. Полное пропускание инструмента составляет порядка $17 \div 33\%$. При ча-

совом накоплении сигнала предельная звездная величина с $S/N = 100$ варьируется от 11^m (К-полоса, режим высокого разрешения), до 16.5^m (J-полоса, режим низкого разрешения). Аналогично, при $S/N = 10$ предельная звездная величина варьируется от 14^m до 19^m .

В GIANO коллиматор и камера совмещены в один оптический прибор — набор из трех рефлекторов, работающий в двухпроходном режиме [48]. При работе в режиме высокого разрешения эшелле установлена в конфигурации, близкой к схеме Литтрова со смещением вдоль щели на 5° . Кросс-дисперсором служит набор призм, изготовленных из материала с высокой дисперсией в ИК-диапазоне, причем свет проходит призмы дважды — до и после эшелле.

Введение теплой предщелевой оптики GIANO обусловлено необходимостью внесения в световой пучок абсорбционной ячейки либо анализатора поляризации и/или камеры подзора для контроля положения объекта [47]. В обычном режиме работы свет в предщелевой части проходит компенсирующую оптику и компенсатор вращения поля (что необходимо при наблюдении протяженных объектов). Для контроля положения объекта используются боковые части поля, перенаправляемые на камеру подзора. В режиме абсорбционной ячейки компенсатор вращения не используется, т.е. в этом режиме наблюдаются только одиночные объекты. В целях снижения тепловых шумов газовая абсорбционная ячейка помещается в отдельный криостат. В поляриметрическом режиме в световой пучок вносятся четверть- или полуволновые пластинки, призма Волластона и компенсатор вращения поля. Для прецизионной юстировки оптики спектрографа зеркала объектива/камеры расположены на подвижных платформах, снабженных микрометрическими винтами [2].

Для работы со светоприемником в GIANO используется контроллер Fasti [49, 42], имеющий гибкую систему настройки генератора тактовых импульсов (что позволяет создать довольно однородное поле напряжений смещения — bias). Fasti содержит четыре 16-битных АЦП, позволяющих одновременно обслуживать все четыре квадранта светоприемника HAWAII. Шумы данного контроллера достаточно низки для проведения наблюдений слабых объектов.

Область использования спектрографа GIANO — поиск планет около холодных маломассивных звезд, изучение областей звездообразования, изучение атмосфер холодных звезд, определение масс центральных черных дыр некоторых галактик, изучение малых тел солнечной системы, наблюдение коричневых карликов, наблюдение объектов с большими z и др.

NAHUAL — эшелле-спектрограф высокого разрешения в близком ИК-диапазоне, работающий на 10.4 м телескопе GTC (большой канарский телескоп) [27]. Основное предназначение прибора — поиск экзопланет около холодных звезд и коричневых карликов. Кроме кросс-дисперсора (призма) прибор не содержит преломляющих элементов, что значительно увеличивает его проникаемость и уменьшает шумы в ИК-диапазоне. Разрешение прибора $R \sim 50000$, рабочая спектральная область — $0.9 \div 2.4$ мкм. В качестве светоприемника в NAHUAL используется матрица HAWAII-2 2048×2048 пикселей. Для увеличения спектральной стабильности прибора его располагают в фокусе Несмита, имеющем температурный контроль. Для обеспечения автокалибровки спектров используется абсорбционная ячейка либо добавочный калибровочный спектр, вводимый при помощи оптоволоконка.

Аналогичный массив $2k \times 2k$ использован в инфракрасной камере с большим полем OMEGA2000 на телескопе в Калар Альто [17]. Вся оптика камеры вместе со светоприемником помещена в криостат, в котором поддерживается температура 77 К. Данная камера использовалась для инфракрасного обзора ранних галактик с $z > 1$.

Интересное решение для повышения проникаемости спектрального прибора ИК-

диапазона предложено Грэхемом и др. [46]. ИК спектрограф для Большого Космического телескопа разработан ими по схеме интерферометра Майкельсона (Фурье-спектрограф). Устройства такого класса сочетают высокую проникаемость и компактность. Основное предназначение данного спектрографа исследование галактик на больших z . Данный прибор наиболее эффективен при спектроскопии протяженных объектов или многообъектной спектроскопии. Разрешение прибора (в волновых числах) составляет порядка $\delta k = 1 \text{ см}^{-1}$ в диапазоне $1 \div 15 \text{ мкм}$.

5.3 Спектрофотометрия

Смешанные приборы имеют возможность работать в двух режимах: фотометра и спектрографа. Например, мексиканская камера-спектрограф CAMILA, разработанная для 2.1-м телескопа SPM, сочетала в себе набор камер $f/4.5$, $f/13.5$ и $f/47.25$ и спектрограф, работающий в трех режимах: низкого ($R \approx 400$), среднего ($R \approx 2760$) и умеренного ($R \approx 12800$) разрешения [4]. Оптическая часть инструмента охлаждалась до -50°C . Светоприемником служил набор из четырех HgCdTe-матриц 256×256 пикселей, помещенный в отдельный криостат с температурой 60 К. Прибор имел хорошие характеристики в рабочем диапазоне $1 \div 2.5 \text{ мкм}$ и предел чувствительности $\sim 18^m$.

1.88-м телескоп японской обсерватории Окияма оснащен ИК-камерой/спектрографом OASIS, использующейся для фотометрии и длиннощелевой спектроскопии [28]. В инструменте используются HgCdTe матрицы NICMOS3 256×256 пикселей. При фотометрии масштаб изображения составляет $0.97''/\text{пиксель}$, в режиме длиннощелевой спектроскопии инструмент обеспечивает спектральное разрешение $R = 150 \div 1000$ (в зависимости от выбора решетки-300 или 75 штр./мм). Оптика прибора охлаждается до 110 К, в то время как температура светоприемника удерживается на отметке 80 К (процесс охлаждения от комнатной до рабочей температуры занимает порядка двух суток). В связи с особенностями географического положения обсерватории, спектральный диапазон прибора был ограничен величиной 2.5 мкм (для больших длин волн атмосферное поглощение резко возрастало).

Для фокуса Несмита 8.2-м телескопа Субару была разработана охлаждаемая камера-спектрограф ИК-диапазона CISCO [8]. Весь прибор помещен в криостат цилиндрической формы, в котором поддерживается давление порядка 10^{-5} Па и температура около $54 \div 59 \text{ К}$. Спектральное разрешение прибора (при работе в режиме спектрографа) порядка $200 \div 250$ в диапазоне $0.8 \div 2.5 \text{ мкм}$. Для изменения разрешения спектрографа и рабочей спектральной области фотометра призма, набор гризм и набор фильтров расположены в турели, управляемой шаговым двигателем. Шум считывания и темновой ток прибора достаточно малы для работы со слабыми объектами (22.4^m при фотометрии и 19.7^m при спектроскопии).

Еще одним универсальным прибором телескопа Субару стал MOIRCS [26]. В фокусе камеры инструмента установлены два светоприемника HAWAII-2 2048×2048 пикселей. Данный прибор работает в диапазоне длин волн $0.85 \div 2.5 \text{ мкм}$. Изменение режима работы происходит путем установки/удаления щелевой маски (алюминиевый лист, щели в котором вырезаны при помощи лазерной резки), расположенной на входе прибора, и внесением в коллимированный световой пучок светофильтра или гризмы, расположенных в трех турелях. Размер прибора, целиком помещенного в криостат, составляет порядка $2 \times 2 \times 2 \text{ м}^3$, вес — 2.3 т. Увеличение поля зрения осуществляется посредством расщепления его на две части наклонными зеркалами, установленными непосредственно за фокальной плоскостью телескопа. Криостат разделяется секцией турелей, выполняющей дополнительную функцию теплоизолятора, на два отсека — коллиматора и камеры, — имеющие раздельное охлаждение. Набор

масок также находится в собственном криостате. Отсек коллиматоров охлаждается до температуры 100 К, в то время как в отсеке камер, в котором расположены и светоприемники, охлаждается до 77 К. Считывание сигнала с контроллера матриц производится цифровым сигнальным процессором, подключенным к PCI-слоту ЭВМ. Контроллер матриц содержит восьмиканальный предусилитель и АЦП, что позволяет расширить динамический диапазон накопленного матрицей заряда до 32 бит. Цифровой сигнальный процессор не только позволяет быстро считывать сигнал с матриц (от 1.4 до 11.5 с в зависимости от режима работы контроллера), но и автоматически вычитает из него уровни смещения (bias).

6 Обработка ИК-изображений

6.1 Определение параметров светоприемника

Уровень сигнала в цифровых единицах, считанного с АЦП контролирующей светоприемник микроэлектроники, напрямую определяется коэффициентом усиления сигнала, накопленного матрицей, разрядностью АЦП и некоторыми другими параметрами.

Вычисление g — коэффициента перевода накопленного матрицей заряда (e^-) в цифровые единицы (ADU) можно произвести на основе статистики шумов матрицы по формуле [28, 26]

$$N_{\text{total}}^2 = N_{\text{read}}^2 + \frac{S}{g},$$

где N_{total}^2 — суммарный шум, N_{read}^2 — шум считывания, S — уровень сигнала (все единицы в ADU, g — в e^-/ADU). Для формирования однородного сигнала перед входным окном прибора можно поместить нагретую металлическую пластину. Уровнем S считается средний арифметический уровень сигнала из серии измерений с одинаковыми условиями, значением N_{total} является среднеквадратическое отклонение S , N_{read} вычисляется вместе с g по аппроксимирующей кривой.

Следующей характеристикой светоприемника являются темновые токи, влияние которых резко возрастает с увеличением рабочей длины волны. Темновые токи ИК-светоприемника можно измерить, например, посредством получения изображений охлажденной до температуры порядка 100 К металлической пластины. Из изображений этой же пластины при коротких выдержках можно определить шум считывания.

Для получения кадров плоских полей можно также воспользоваться одним из следующих методов [53].

- Наблюдение внутренней поверхности купола башни телескопа с экспозицией, равной экспозиции основного снимка.
- Наблюдение сумеречного неба. Недостатком указанных двух методов является отличие спектральной характеристики полученных сигналов от спектра объекта, кроме того, при наблюдении сумеречного неба следует учитывать постоянное изменение во времени его яркости и спектрального состава.
- Медианное усреднение значительного количества снимков участков неба, полученных в течение всей наблюдательной ночи. Однако, этот метод тоже не лишен недостатков, т.к. в течение наблюдений возможны вариации яркости фона из-за изменения температуры или активности воздушных потоков.

Определение пропускания прибора (отношение количества накопленных в ячейке матрицы электронов к количеству собранных телескопом в данной частотной области фотонов)

производится из наблюдений стандартных звезд по формуле [26]

$$\gamma = \frac{C_{\text{obj}}g}{F_{\lambda \text{obj}}A\Delta\lambda},$$

где C_{obj} – поток излучения от объекта в ADU/c; $F_{\lambda \text{obj}}$ – поток фотонов от объекта на единицу площади в единичном частотном интервале; A – эффективная площадь оптики телескопа; $\Delta\lambda$ – интервал длин волн, в котором производятся измерения.

Линейность светоприемника и предельная емкость его ячеек определяется из зависимости уровня выходного сигнала, S , от времени накопления, t , для одного и того же источника (например, теплой калибровочной металлической пластины). Наиболее линейная область полученной зависимости аппроксимируется степенной функцией $S = t^\gamma$, где γ – показатель линейности. Экстраполяция полученной зависимости в область $t \rightarrow \infty$ дает значение предельной емкости ячеек светоприемника.

Так как КМОП-детекторы принципиально отличаются от ПЗС, нельзя не упомянуть об эффекте, неизбежно возникающем при использовании данных светоприемников. В идеале каждый пиксель светоприемника представляет собой, по сути, комбинацию из фотодиода, регистрирующего излучение; конденсатора, накапливающего генерирующиеся фотодиодом электроны; ключа заряда нулевого смещения (bias), устанавливающего начальный заряд на конденсаторе; предварительного усилителя на полевом транзисторе и сопротивления утечки. Однако, стремление увеличить эффективность ИК-светоприемников, приводит к значительному увеличению сопротивления утечки. В результате, после проведения считывания сигнала, в ячейках детекторов наблюдается остаточный заряд, являющийся аддитивной добавкой при проведении следующего наблюдения и вносящий дополнительные шумы.

В связи с тем, что все характеристики КМОП-светоприемника сильно чувствительны к его рабочей температуре, для каждого светоприемника необходимо тщательно подобрать оптимальную рабочую температуру [28]. Т.е. изучение характеристик детектора следует производить при различных температурах светоприемника (в рамках допустимого изготовителем диапазона), и в качестве рабочей выбрать температуру, при которой полезные характеристики будут наибольшими, в то время как шумы – в пределах допустимого уровня.

6.2 Коррекция плоских полей

Плоские поля получают посредством вычитания медианы темновых кадров из снимков внутренней поверхности купола телескопа [15]. При этом следует сразу сделать коррекцию плоского поля на «горячие» пиксели (посредством обнуления значений пикселей, отличающихся от медианы в квадрате 15×15 пикселей более, чем на 5σ). Кроме того, необходимо аналогичным образом обнулить значения пикселей с резко отличающимся от медианы по всей матрице коэффициентом усиления (более, чем на 30%). После этого производится обычная коррекция данных на плоские поля.

6.3 Вычитание небесного фона

При получении снимков небесных объектов в ИК-диапазоне приходится сталкиваться с фоновым шумом, происхождение которого определяется тремя источниками: атмосферой, светоприемником и тепловым излучением оптической аппаратуры [53].

В нулевом порядке фон представляет собой аддитивную добавку к общему уровню сигнала. Атмосферный компонент фона обычно преобладает в полосах J и K' , причем его уровень

меняется со временем. Наиболее сложной задачей является получение изображений в ближнем ИК-диапазоне в связи с высоким уровнем фона в полосах $J \div K'$. Поэтому столь важной задачей является качественное и точное определение фонового уровня.

По причине довольно высокой яркости фона, максимальное время экспозиции при ИК-фотометрии определяется уровнем насыщения ячеек светоприемника. Таким образом, при определении максимальной экспозиции в какой-либо фотометрической полосе необходимо учитывать поток энергии фона в этой полосе. Так как уровень фона варьируется со временем, при наблюдениях необходимо чередовать изображения объекта и фона. Кроме того, следует учитывать скорость изменения яркости фона, что также может накладывать ограничения на предельное время экспозиции объекта и фона. Получение изображений фона зачастую затрудняется тем, что в поле зрения могут находиться звезды и прочие объекты. В этом случае необходимо последовательно получить несколько кадров фона со сдвигом в $10 \div 20''$, а затем отфильтровать их медианой.

Одним из вариантов получения изображений фона является следующий. Несколько ($8 \div 10$) кадров данных медианно усредняются. Затем на полученном кадре определяются координаты и радиусы объектов (звезд, туманностей и т.п.). Для надежного предотвращения попадания излучения от объекта в фон радиусы объектов увеличивают в $1.5 \div 2$ раза. Далее производится сглаживание фона (например, полиномиальное) с интерполяцией в пропущенных регионах. Полученное изображение вычитается из кадра данных для коррекции на небесный фон.

Яркость фона определяется по формуле [26]

$$m_{\text{bg}} = -2.5 \lg\left(\frac{C_{\text{bg}} g \gamma h c}{A \lambda \Delta \lambda \theta^2}\right) + m_0 - 10,$$

где C_{bg} – уровень фонового потока в ADU/c; h – постоянная Планка; λ – центральная длина волны диапазона $\Delta\lambda$, пропускаемого фильтром; θ – угловой масштаб изображения на один пиксель; c – скорость света; m_0 – фотометрическая нулевая точка (звездная величина объекта, вызывающего накопление сигнала в 1 ADU за единицу времени), вычисленная из пропускания светоприемника по освещенности, создаваемой Вегей.

6.4 Определение относительного смещения кадров

При получении ИК-обзоров участков неба обычно проецируют избранные участки так, чтобы в итоге получалась мозаика изображений размера 3×3 или 4×4 . Для соединения полученных изображений необходимо точно определить относительные смещения кадров. После коррекции полученных изображений (фильтрация и т.п.) вычисляются их относительные сдвиги посредством интерполяции параболой кросс-корреляционной функции кадров. Для увеличения скорости процедуры кросс-корреляции в ней используется информация о координатах объектов, их интенсивности и размерах. Таким образом достигается точность определения относительных сдвигов порядка 0.1 пикселей.

6.5 Получение панорамного изображения

Для получения панорамы вначале необходимо нормализовать уровень сигнала на отдельных снимках (он может отличаться в связи с различной чувствительностью матриц, различным временем экспозиции и дисперсией уровня сигнала): $w_i = g_i t / V$, где w_i – весовая функция i -го пикселя; g_i – «коэффициент усиления», полученный исходя из анализа плоских полей;

t – время экспозиции; V – дисперсия уровня сигнала на изображении. Весовые функции для каждого изображения сглаживаются полиномами второй степени. Далее изображения корректируются на весовые функции.

Получение панорамных изображений достигается обычно путем комбинации нескольких смещенных кадров. Минимальное количество таких кадров определяется геометрией светоприемника. Например, для CIRSI оно равно четырем: каждый последующий кадр получается путем смещения поля в двух взаимно перпендикулярных направлениях (относительно расположения светоприемников) на расстояние, равное размеру светоприемника.

В камере VISTA из-за значительного количества светоприемников, при составлении панорамы необходима некоторая избыточность информации для возможности коррекции уровней сигнала на отдельных светоприемниках. Для составления панорамы последовательно получают шесть изображений исследуемого поля со сдвигом 0.95 размеров светоприемника в одном направлении и 2×0.475 размеров светоприемника в перпендикулярном направлении (расстояние между рабочими поверхностями светоприемников составляет 0.90 их размеров) [55]. При этом избыточность информации даже в случае минимального количества измерений позволяет восстановить утерянные либо искаженные данные (космические частицы, «плохие пиксели» и т.п.). Минимальный объем информации, получаемый при таком способе, составляет 268.4 МБ за одну сессию. При интенсивном наблюдении объем информации за одну ночь составляет порядка 1.35 ТБ.

6.6 Системы сбора и обработки данных

Разработчики многих ИК-приборов предпочитают использовать для сбора и обработки данных собственное программное обеспечение. Например, для спектрографа GIANO было специально разработано практически все программное обеспечение — от получения кадров с матриц HAWAII и до их окончательной обработки [13]. Из сторонних разработок использовалась только библиотека WCSLIB, предназначенная для автоматической калибровки длин волн эшелле-спектрографов.

Изначально для обработки данных, полученных CIRSI, в среде IRAF был разработан пакет CIRDR [7]. Этот пакет сочетает в себе все функции, необходимые для сбора информации с ИК-светоприемника, ее предварительной обработки и анализа.

Список литературы

- [1] A study on the use of the PACS bolometer arrays for submillimeter ground-based telescopes / V. Reveret, L. R. Rodriguez, P. André et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6275 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2006.
- [2] Alignment-invariant mirror holder for cryogenic environment and its application to GIANO-TNG / I. Mochi, C. Baffa, S. L. Donati et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6273 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2006.
- [3] An eight-element bolometer array camera for the Wyoming Infrared Observatory 2.34-m telescope / T. C. Williams, G. L. Grasdalen, J. Hackwell, R. D. Gehrz // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 1988. — Vol. 100. — Pp. 124–130.

Список литературы

- [4] Camila: infrared camera/spectrograph. / I. Cruz-González, L. Carrasco, E. Ruiz et al. // *Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica*, vol. 29. — 1994. — Vol. 29. — Pp. 197–201.
- [5] *Campbell M. F., Haser L., Drapatz S.* Fabry-Perot Etalons as Prefilters for Far-Infrared Fourier Transform Spectroscopy // *Bulletin of the American Astronomical Society*. — Vol. 18 of *Bulletin of the American Astronomical Society*. — 1986. — P. 945.
- [6] Characterization of mid-infrared single mode fibers as modal filters / A. Ksendzov, O. Lay, S. Martin et al. // *Applied Optics*. — 2007. — Vol. 46. — Pp. 7957–7962.
- [7] CIRSI Data Reduction System – CIRDR / S. J. Chan, S. E. Persson, R. G. McMahon et al. // *Astronomical Data Analysis Software and Systems VIII* / Ed. by D. M. Mehringer, R. L. Plante, D. A. Roberts. — Vol. 172 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 1999. — Pp. 502–505.
- [8] CISCO: Cooled Infrared Spectrograph and Camera for OHS on the Subaru Telescope / K. Motohara, F. Iwamuro, T. Maihara et al. // *Publ. Astron. Soc. Japan*. — 2002. — Vol. 54. — Pp. 315–325.
- [9] Cooling Systems for Far-Infrared Telescopes and Instruments / W. A. Holmes, T. Chui, D. Johnson et al. // *Astronomy*. — 2009. — Vol. 2010. — Pp. 13–23.
- [10] Diffraction-limited astronomical infrared imaging through the turbulent atmosphere / J. C. Christou, J. D. Freeman, D. W. McCarthy Jr. et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* — 1988. — Vol. 21. — Pp. 49–52.
- [11] *Dutil Y., Roy J.-R.* The Hazards of Imaging Spectrophotometry with Interference Filters // *Astron. J.* — 2001. — Vol. 122. — Pp. 1644–1655.
- [12] *Fellgett P. B.* An exploration of infra-red stellar magnitudes using the photo-conductivity of lead sulphide // *Mon. Not. of Royal Astron. Soc.* — 1951. — Vol. 111. — Pp. 537–559.
- [13] GIANO: software design and acquisition facilities / E. Rossetti, P. Montegriffo, C. Baffa et al. // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — Vol. 6274 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2006.
- [14] *Holan G. D., Smith S. D.* Far infrared interference filters // *J. Phys. E: Sci. Instrum.* — 1977. — Vol. 10. — Pp. 101–111.
- [15] Infrared Imaging Data Reduction Software and Techniques / C. N. Sabbey, R. G. McMahon, J. R. Lewis, M. J. Irwin // *Astronomical Data Analysis Software and Systems X* / Ed. by F. R. Harnenden, Jr., F. A. Primini, H. E. Payne. — Vol. 238 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*. — 2001. — Pp. 317–320.
- [16] *Johnson H. L.* Infrared Stellar Photometry. // *Astrophys. J.* — 1962. — Vol. 135. — Pp. 69–77.
- [17] *Kovács Z.* Test of the Infrared Wide-Field Camera OMEGA2000 and its Application for an Extragalactic Survey // *Publications of the Astronomy Department of the Eotvos Lorand University*. — 2006. — Vol. 17. — Pp. 161–166.
- [18] *Kuiper G. P., Wilson W., Cashman R. J.* An Infrared Stellar Spectrometer. // *Astrophys. J.* — 1947. — Vol. 106. — Pp. 243–251.
- [19] *Labadie L., Wallner O.* Mid-infrared guided optics: a perspective for astronomical instruments // *Optics Express*. — 2009. — Vol. 17. — Pp. 1947–1962.

Список литературы

- [20] Large-format long-wavelength GaAs/AlGaAs multiquantum well infrared detector arrays for astronomy / S. D. Gunapala, S. V. Bandara, J. J. Bock et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series / Ed. by G. J. Brown, M. Razeghi. — Vol. 4288 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2001. — Pp. 278–285.
- [21] *Lemke D.* The short history of infrared space telescopes // *Astronomische Nachrichten*. — 2009. — Vol. 330. — Pp. 562–567.
- [22] *Lieberman A. A., Moroz V. I., Shenavrin V. I.* Infrared observations of Nova CYG 1975 IV. Photometry with a germanium bolometer cooled by liquid He. // *Soviet Astronomy Letters*. — 1976. — Vol. 2. — Pp. 39–40.
- [23] *McLean I. S.* Electronic imaging in astronomy. Detectors and instrumentation. — 2 edition. — Springer-Praxis, 2008. — Electronic imaging in astronomy. Detectors and instrumentation (Second edition), Publisher: Springer, 2008, 576 p. Series Springer-PRAXIS books in astronomy and planetary sciences. Published in association with Praxis Publishing, Chichester. ISBN 978-3-540-76582-0.
- [24] *Merrill P. W.* A Plane-Grating Spectrograph for the Red and Infra-Red Regions of Stellar Spectra // *Astrophys. J.* — 1931. — Vol. 74. — Pp. 188–202.
- [25] *Miles R.* A light history of photometry: from Hipparchus to the Hubble Space Telescope // *Journal of the British Astronomical Association*. — 2007. — Vol. 117. — Pp. 172–186.
- [26] Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph (MOIRCS) for the Subaru Telescope I. Imaging / R. Suzuki, C. Tokoku, T. Ichikawa et al. // *Publ. Astron. Soc. Japan*. — 2008. — Vol. 60. — Pp. 1347–1362.
- [27] NAHUAL: a near-infrared high-resolution spectrograph for the GTC optimized for studies of ultracool dwarfs / E. L. Martín, E. Guenther, D. Barrado y Navascués et al. // *Astronomische Nachrichten*. — 2005. — Vol. 326. — Pp. 1015–1019.
- [28] OASIS: A Multi-Purpose Near-Infrared Camera and Spectrograph / S.-i. Okumura, E. Nishihara, E. Watanabe et al. // *Publ. Astron. Soc. Japan*. — 2000. — Vol. 52. — Pp. 931–942.
- [29] *Oliva E.* Infrared instrumentation for large telescopes : an alternative approach // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. — 2000. — Vol. 71. — Pp. 861–868.
- [30] *Oliva E.* NICS, the Near Infrared Camera-Spectrometer of the TNG // *Memorie della Societa Astronomica Italiana*. — 2003. — Vol. 74. — Pp. 118–125.
- [31] *Oliva E., Origlia L.* High-resolution near-IR spectroscopy: from 4m to 40m class telescopes // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 7014 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*. — 2008.
- [32] *Rieke G. H.* Infrared Detector Arrays for Astronomy // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — Pp. 77–115.
- [33] *Rieke G. H.* History of infrared telescopes and astronomy // *Experimental Astronomy*. — 2009. — Pp. 7–24.
- [34] *Rossano G. S., Russell R. W., Cornett R. H.* Near infrared photography with a vacuum-cold camera // *Publ. Astron. Soc. Pacific*. — 1980. — Vol. 92. — Pp. 357–361.
- [35] Scientific Detectors for Astronomy 2005 / Ed. by J. E. Beletic, J. W. Beletic, P. Amico. — 2006.

Список литературы

- [36] *Simons D. A., Tokunaga A.* The Mauna Kea Observatories Near-Infrared Filter Set. I. Defining Optimal 1-5 Micron Bandpasses // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 2002. — Vol. 114. — Pp. 169–179.
- [37] *Sonneborn G.* Study of Planetary Systems and Solar System Objects with JWST // *Astronomy.* — 2009. — Vol. 2010. — Pp. 280–286.
- [38] *Swings P.* Possibilities of Astronomical Spectroscopy in the Infrared // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 1944. — Vol. 56. — Pp. 220–229.
- [39] Teledyne Imaging Sensors: infrared imaging technologies for astronomy and civil space / J. W. Beletic, R. Blank, D. Gulbransen et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 7021 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2008.
- [40] The 10-micron infrared camera TIRCAM / A. Ferrari, E. Anderlucci, M. Busso et al. // *Memorie della Societa Astronomica Italiana.* — 1989. — Vol. 60. — Pp. 247–250.
- [41] The CIRSI-INT IR Survey / R. G. Sharp, R. G. McMahon, S. Hodgkin, C. D. Mackay // *The Newsletter of the Isaac Newton Group of Telescopes.* — 2002. — Vol. 6. — Pp. 16–18.
- [42] The Fasti Project / C. Baffa, V. Biliotti, A. Checcucci et al. // Astronomical Data Analysis Software and Systems XII / Ed. by H. E. Payne, R. I. Jedrzejewski, R. N. Hook. — Vol. 295 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series.* — 2003. — Pp. 355–358.
- [43] The GIANO-TNG spectrometer / E. Oliva, L. Origlia, C. Baffa et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6269 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2006.
- [44] The Las Campanas Infrared Survey Camera / S. E. Persson, D. C. Murphy, S. M. Gunnels et al. // *Astron. J.* — 2002. — Vol. 124. — Pp. 619–634.
- [45] The New Near Infrared Array Camera at the University of Rochester / W. J. Forrest, A. Moneti, C. E. Woodward et al. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 1985. — Vol. 97. — Pp. 183–198.
- [46] The Performance and Scientific Rationale for an Infrared Imaging Fourier Transform Spectrograph on a Large Space Telescope / J. R. Graham, M. Abrams, C. Bennett et al. // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 1998. — Vol. 110. — Pp. 1205–1215.
- [47] The preslit system of GIANO-TNG / P. Bruno, F. Leone, E. Oliva et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6269 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2006.
- [48] The spectrometer optics of GIANO-TNG / S. Gennari, I. Mochi, S. L. Donati et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6269 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2006.
- [49] The versatile acquisition system of Giano / C. Baffa, V. Biliotti, S. Gennari et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6274 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2006.
- [50] The Visible & Infrared Survey Telescope for Astronomy / J. P. Emerson, W. J. Sutherland, A. M. McPherson et al. // *The Messenger.* — 2004. — Vol. 117. — Pp. 27–32.
- [51] The VISTA infrared camera / G. B. Dalton, M. Caldwell, A. K. Ward et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — Vol. 6269 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2006.

Список литературы

- [52] Transmission curves and effective refraction indices of MKO near infrared consortium filters at cryogenic temperatures / F. Ghinassi, J. Licandro, E. Oliva et al. // *Astron. & Astrophys.* — 2002. — Vol. 386. — Pp. 1157–1159.
- [53] *Vaduvescu O., McCall M. L.* Strategies for Imaging Faint Extended Sources in the Near-Infrared // *Publ. Astron. Soc. Pacific.* — 2004. — Vol. 116. — Pp. 640–651.
- [54] *Vauglin I.* Recent developments of infrared array cameras in France // *Astrophys. Space Sci.* — 1990. — Vol. 171. — Pp. 275–278.
- [55] VISTA data flow system: overview / J. P. Emerson, M. J. Irwin, J. Lewis et al. // Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series / Ed. by P. J. Quinn, A. Bridger. — Vol. 5493 of *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2004. — Pp. 401–410.
- [56] *Wijnbergen J. J.* Some filter techniques in the far infrared // *Space Science Reviews.* — 1975. — Vol. 17. — Pp. 657–658.