МНОГОКАНАЛЬНАЯ АСТРОНОМИЯ

- Электромагнитные волны
- Нейтрино
- Космические лучи
- Гравитационные волны
- Астрономическая картина мира



ВЕК2

ДМК издательство

Под редакцией академика А. М. Черепащука

УДК 52
ББК 22.6
М73

М73 Многоканальная астрономия / Ред.-сост. А. М. Черепащук. — Эл. изд. — 1 файл pdf : 546 с. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-228-1

Прогресс в области астрономических исследований тесно связан с развитием новых методов наблюдений небесных тел.

В первой части книги изложены методы исследования Вселенной в различных каналах: электромагнитном (от радио до гамма диапазона), нейтринном, канале космических лучей, гравитационно-волновом канале. Во второй — кратко описаны новейшие достижения астрономии и астрофизики, которых удалось достичь, благодаря всеволновому и многоканальному характеру современной астрономии.

Книга представляет собой совместный труд более двадцати ведущих ученых, работающих в различных областях астрономии и астрофизики.

Насколько нам известно, это первая книга в нашей стране о современной многоканальной астрономии и её методах и, по-видимому одна из первых в мире. Отличное дополнение к популярной книге «Астрономия: век XX».

УДК 52
ББК 22.6

Электронное издание на основе печатного издания: Многоканальная астрономия / Ред.-сост. А. М. Черепащук. — Москва : ДМК Пресс, 2022. — 528 с. : ил. — ISBN 978-5-89818-128-4. — Текст : непосредственный.

На 1-й стороне обложки — Запущенная в 2019 году орбитальная обсерватория «Спектр-РГ»,
Туманность «Кошачий глаз» — телескоп им. Хаббла (NASA), Монтаж — ИКИ/МРЕ/НПО им. Г. А. Лавочкина

На 4-й стороне обложки — Космический телескоп имени Джеймса Уэбба — орбитальная инфракрасная обсерватория, которая заменит космический телескоп «Хаббл» (NASA).

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-228-1

© Состав, оформление. Век 2, 2019
© Переиздание. ДМК Пресс, 2022

Оптический диапазон

Введение

Оптическим (или видимым) диапазоном электромагнитных волн в астрономии принято считать область электромагнитного спектра с длинами волн от 400 до 760 нм, т.е. свет, воспринимаемый человеческим глазом. В различных книгах и статьях границы оптического диапазона могут варьироваться вплоть до 350–1050 нм, что примерно соответствует диапазону чувствительности основных, на сегодняшний день, приемников излучения оптического диапазона — приборов с зарядовой связью (ПЗС).

Земная атмосфера, к счастью, практически прозрачна в оптическом диапазоне, и если на небе нет облаков, мы можем наблюдать Солнце, Луну, звезды, планеты, кометы и другие небесные тела (рис. 1). В оптическом диапазоне пропускание атмосферы Земли на практике ограничивается лишь слабыми линиями поглощения кислорода и рядом линий других незначительно влияющих элементов, что позволяет почти беспрепятственно вести наблюдения с поверхности Земли. Помимо линий поглощения в атмосфере также присутствуют аэрозоли — мелкие пылевые частицы, поглощающие или рассеивающие часть света, идущего от небесных тел.

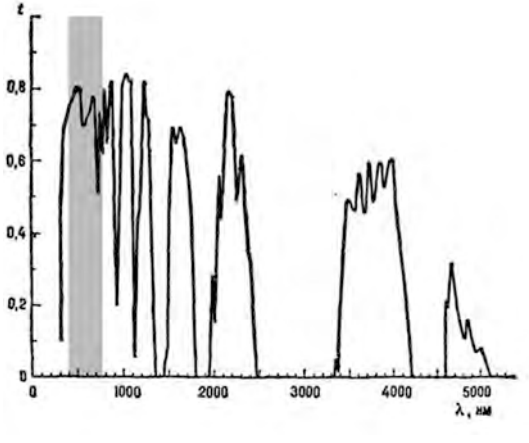


Рис. 1. Кривые пропускания атмосферы Земли в средних широтах на уровне моря. Оптический диапазон отмечен серым прямоугольником.

Помимо частичного поглощения, волновой фронт в оптическом диапазоне, идущий от космических объектов, изучаемых в

© А.А. Белинский, С.А. Потанин, 2018

астрономии, подвергается влиянию турбулентности в земной атмосфере. Этот факт ограничивает угловое разрешение телескопов расположенных на земной поверхности, до величин 0",5–2" (угловых секунд), что соответствует весьма умеренному диаметру объектива телескопа, согласно приближённой формуле:

$$\theta = 1{,}22 \times \lambda / D_{\text{тел}}.$$

Телескоп с диаметром объектива 14 см уже способен достигнуть разрешающей способности в 1 угловую секунду! Поэтому крупные оптические телескопы устанавливаются на Земле в тщательно изученных местах, как правило, в горах, условия на которых отличаются большим количеством ясных ночей и низкой степенью турбулентности атмосферы в большую часть года.

Основным инструментом астрономических исследований в оптическом диапазоне электромагнитных волн является телескоп. Однако, телескоп – лишь устройство позволяющее собрать свет от исследуемого объекта, научные же задачи решаются с помощью различной приемной аппаратуры. Основными задачами являются:

- получение детальных изображений объектов;
- измерение положений, угловых размеров и взаимного расположения небесных объектов;
- фотометрические исследования – измерение количества фотонов, приходящих от объекта;
- спектрофотометрические измерения – распределение количества фотонов от исследуемого объекта в зависимости от длины волны (или энергии регистрируемых фотонов);
- спектроскопия – исследование химического состава и/или лучевой скорости объекта относительно наблюдателя.

История оптического телескопостроения

Вплоть до XVII века, когда Галилео Галилей направил первый телескоп собственного изготовления на небо, глаза человека были первым и единственным способом познания окружающей нас Вселенной.

В 1609 году Галилео Галилей изготовил сначала трехкратную зрительную трубу, а позже в том же году – трубу с восьмикратным увеличением. Первые зрительные трубы состояли из двух линз: объектив – двояковыпуклая линза и окуляр – двояковогнутая. В дальнейшем такая схема зрительной трубы получила имя Галилея.

Первые наблюдения неба Галилеем с помощью зрительной трубы, в дальнейшем названной «телескоп», принесли целую россыпь открытий: спутники Юпитера, фазы Венеры, природа пепельного цвета Луны и рельеф ее поверхности, пятна на Солнце и многие другие.

Схема телескопа Галилея имеет ряд недостатков: малое поле зрения и значительные хроматические аберрации, однако к числу ее преимуществ относятся простота изготовления и неперевернутое изображение. Такая схема до сих пор используется в театральных биноклях.



Рис. 2. Телескоп Галилея

В 1611 году Иоганн Кеплер предложил собственную оптическую схему телескопа, где в качестве окуляра используется собирающая линза, установленная за промежуточным фокусом объектива (рис. 3). Схема телескопа Кеплера имеет заметно большее поле зрения, но строит перевернутое изображение. Важной особенностью схемы Кеплера является возможность помещения в фокус окуляра креста нитей или шкалы для измерения положения светил. Значительная хроматическая аберрация линзовых объективов телескопа до момента изобретения в XVIII веке ахроматов минимизировалась путем уменьшения относительного отверстия до значительных величин. Телескопы того времени имели длинные трубы, соединяющие объектив и окуляр, иногда для уменьшения веса вместо трубы использовалась пространственная ферма.

В дальнейшем развитие телескопов-рефракторов (телескопов с линзовым объективом) двигалось по пути увеличения диаметра объектива и создания ахроматических и апохроматических объективов уменьшающих влияние хроматических аберраций.

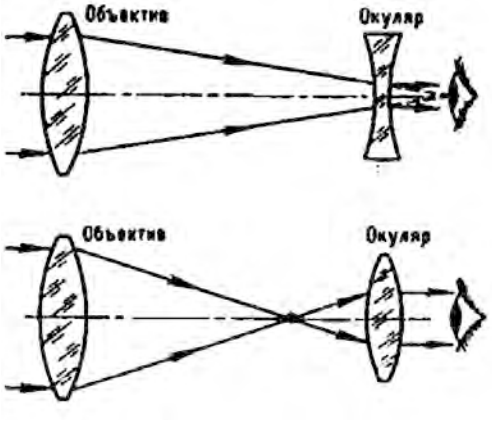


Рис. 3. Схема рефракторов Галилея (вверху) и Кеплера (внизу)

Всего лишь через несколько лет после изготовления Галилеем своего телескопа, были предложены различные схемы телескопов-рефлекторов, у которых в качестве объектива предлагалось использовать параболическое или сферическое вогнутое зеркало.

Однако первый телескоп-рефлектор с диаметром главного зеркала около 3 сантиметров был построен Исааком Ньютоном в 1668 году по собственной схеме. В конструкции Ньютона небольшое диагональное зеркало вблизи фокуса отбрасывает пучок света в окуляр за пределами тру-

бы. Создание телескопов-рефлекторов позволило практически избавиться от главной проблемы – хроматической аберрации.

В дальнейшем развитие оптики принесло множество оптических схем телескопов. Появились схемы зеркально-линзовых телескопов, значительное поле зрения которых стало востребованным с началом использования в астрономии фотопластинок для регистрации изображений.

В последующие годы развитие телескопов двигалось по пути увеличения диаметра объективов рефракторов и главных зеркал рефлекторов. Если на начальном этапе это обуславливалось желанием получить наибольшее увеличение космических объектов для визуальных наблюдений, то в дальнейшем, с 1850 года, когда было получено первое фотоизображение звезд с помощью телескопа, необходимость в росте собирающей площади объектива телескопа была обусловлена стремлением зарегистрировать все более слабые объекты. Использование методов спектроскопии во второй половине XIX века также стимулировало появление все более крупных телескопов оптического диапазона.

Создание все более крупных оптических телескопов стимулировало не только разработку все более совершенных оптических схем и технологий оптического производства крупногабаритных линз и зеркал с высочайшим качеством оптических поверхностей. Разрабатывались новые виды стекла, а впоследствии стеклокерамики, обладающих сверхнизким коэффициентом температурного расширения. При перепаде температуры окружающей среды от ночи к ночи астрономы–наблюдатели были вынуждены тратить значительное время в ожидании выравнивания температуры крупногабаритных зеркал т.к. градиент температуры в их объеме приводил к искажению оптической поверхности.

Не менее серьезные проблемы приходилось решать при разработке механических узлов крупных телескопов. Первые телескопы XVI–XVIII веков ограничивались примитивными трубами или фермами, соединяющими объектив с окуляром телескопа, и монтировками, обеспечивающими ручное наведение трубы телескопа на объект с помощью шарниров или системы блоков для более крупных инструментов. В дальнейшем, с появлением все более точной оптики и ростом ее размеров, появилась необходимость в сложных механических системах разгрузки зеркал для компенсации их собственного прогиба в различных ориентациях, повышении жесткости и уменьшении веса трубы или пространственной фермы телескопа.

Появление методов фотографической регистрации и необходимость длительных экспозиций при получении спектров стимулировали развитие механики экваториальных монтировок телескопа, у которых одна из осей параллельна оси вращения Земли. Соответственно, для компенсации суточного вращения телескоп, установленный на монтировке, приводился в движение вокруг этой оси с помощью часового механизма (рис. 4).



Рис. 4. Примеры телескопов на немецкой (слева), английской (центр) и вилочной монтировке.

Наибольшую популярность получили три основных разновидности экваториальных монтировок: немецкая, английская и «вилочная». У немецкой монтировки жестко фиксируется полярная ось (параллельно оси вращения Земли), на которую перпендикулярно крепится корпус оси склонения. С одной стороны корпуса располагается труба телескопа, а с другой — противовес, компенсирующий вес трубы телескопа. Немецкая монтировка популярна по сей день для небольших инструментов, как правило, рефракторов, однако она требует в части направлений прерывания наблюдений для перекладки, т.е. обращения телескопа на другую сторону относительно полярной оси.

Все большие размеры и вес телескопов привели к созданию английской монтировки, у которой полярная ось имеет опоры под обоими концами, и ее разновидностей: несимметричной с противовесом, симметричной и симметричной с ярмом.

В дальнейшем, для крупных телескопов стала популярна «вилочная» (или «американская») монтировка, у которой полярная ось заканчивается вилкой, между перьями которой располагается труба.

Одной из наиболее значимых вех развития наблюдательной астрономии стал 100-дюймовый телескоп Хукера, установленный в 1917 году на обсерватории Маунт–Вилсон (США) с главным зеркалом диаметром 2,5 метра (рис. 5). Он оставался крупнейшим в мире вплоть до 1947 года. В первые же годы с его помощью был совершён целый ряд открытий, в частности, Эдвином Хабблом была разрешена на звезды галактика Андромеды (M31) — одна из ближайших соседок нашей Галактики. К этому времени астрономам уже была известна зависимость период–светимость переменных звезд Цефеид и тем самым получены надежные оценки расстояний в локальной области Вселенной. Так бы-

Рис. 5. 100-дюймовый телескоп Хукера



ла поставлена точка в «большом споре» о природе спиральных туманностей и надежно установлено, что они являются удаленными галактиками, подобными нашей, а не газовыми туманностями, к чему склонялась значительная часть астрономов того времени. Дальнейшие спектроскопические исследования галактик привели Хаббла к открытию зависимости между красным смещением галактик и расстоянием до них, впоследствии названой законом Хаббла.

В 1948–49 гг. вступил в строй 200-дюймовый телескоп обсерватории Маунт–Паломар имени Джорджа Хейла, который во многом был инициатором его создания и руководил работами. Главное зеркало телескопа было изготовлено из боросиликатного стекла, имеющего существенно меньший коэффициент теплового расширения, чем у ранее использовавшихся сортов стекла, что существенно улучшило качество изображения при изменении температуры окружающей среды. Кроме того, само зеркало было дополнительно облегчено путем отливки заготовки зеркала с сотовой структурой тыльной стороны. Впервые была внедрена технология алюминирования зеркала путем вакуумного напыления. Наблюдения с помощью телескопа Хейла принесли целый ряд новых данных, и на сегодняшний день он продолжает свою работу. В последние годы он дооборудован элементами адаптивной оптики, на нем ведутся наблюдения быстропротекающих процессов во Вселенной, мониторинг астероидов, работы по исследованию экзопланет. На сегодняшний день, это самый крупный в мире телескоп на экваториальной монтировке.



Рис. 6. Телескоп БТА

Спустя 26 лет, в 1975 году было закончено строительство 6-метрового Большого азимутального телескопа, созданного в СССР и установленного на Северном Кавказе в районе Архыза, на сегодняшний день — Карачаево-Черкесской

республике. БТА на момент постройки обладал целым рядом инновационных решений. Он установлен на альт-азимутальной монтировке, использование которой позволило сделать его существенно компактнее и легче (рис. 6). Однако переход от экваториальной монтировки к альт-азимутальной приводит к тому, что для компенсации суточного движения астрономических объектов элементы монтировки и фокального узла необходимо вращать одновременно с переменными скоростями по трем осям. Решение этой задачи сложно было осуществить до появления управляющих приводами электронно-вычислительных машин. БТА стал первым крупным телескопом, управление которым осуществлялось с помощью ЭВМ. Он пережил несколько значительных модернизаций систем управления и оптики и по сей день успешно используется астрофизиками для наблюдений или исследования, в основном, внегалактических объектов.

Приемники оптического излучения

Первые телескопы могли использоваться лишь для визуальных наблюдений. Приемником излучения являлся глаз наблюдателя. Тем не менее, возможность увидеть с большим угловым разрешением объекты космоса, визуально сравнить блеск наблюдаемого объекта с соседними объектами, провести угловые измерения и сделать зарисовки, позволила заметно продвинуться в исследовании Вселенной. Для визуальной оценки блеска звезд были разработаны специальные методики, позволявшие делать оценки с точностью до десятых долей звездной величины. Визуальные наблюдения в отдельных областях астрономии оставались популярны вплоть до второй половины XX века.

Новый этап начался во второй половине XIX века, когда в астрономии для фиксации изображений стала применяться фотографическая эмульсия, в дальнейшем применялись как фотопластинки, так и эмульсия, нанесенная на гибкую пленку. Фиксация изображения, которое можно было количественно измерить после проявления, позволила накапливать свет от объектов часами, а иногда экспозиция могла продолжаться и несколько ночей подряд. Фотоматериалы можно изготовить с однородным светочувствительным слоем достаточно больших размеров, что позволяло получать изображения достаточно больших полей за одну экспозицию. После проявления, фотоматериал на специальных приборах измерялся для оценки блеска исследуемого объекта и его изменений относительно соседних звезд, измерения положения и размеров объектов. Надо отметить, что квантовая эффективность фотопленки[1], то есть процент фотонов участвующих в формировании изображения, была невелика и не превыша-

[1] Поскольку регистрируются не фотоны, а результат их взаимодействия с приемником (количество кристаллов коллоидного серебра на фотопластинке или количество электронов в современном приемнике), то под квантовой эффективностью понимается отношение общего количества зарегистрированных единиц сигнала к полному числу фотонов, пришедшему на приемник.

ла 3–5%. С помощью специальных методов, называемых гиперсенсибилизацией, астрономы добивались повышения светочувствительности фотоматериала непосредственно перед наблюдениями путем нагрева, промывания в специальных растворах. Наиболее действенные методы гиперсенсебилизации путем выдерживания фотоматериала в водородной атмосфере были разработаны в Государственном астрономическом институте имени П.К.Штернберга. Однако и в этом случае квантовая эффективность не превышала 7–9%. Максимум чувствительности первых фотоматериалов на основе галогенидов серебра лежит в синей и ближней УФ части спектра, граница чувствительности в длинноволновом диапазоне фактически ограничивалась 500 нм. Для получения изображений в длинноволновой области в дальнейшем в фотоэмульсию добавлялись различные вещества сенсибилизирующие фотоматериалы вплоть до ближнего ИК диапазона.

С развитием электронных устройств, созданных на основе фотоэффекта, в астрономии стали применяться фотоэлектронные умножители (ФЭУ) для точного измерения блеска объектов. ФЭУ, как правило, не позволяет получить изображение, а применяется для измерения слабых потоков фотонов путем подсчета импульсов, создаваемых электронной лавиной.

Квантовая эффективность ФЭУ также оставалась до недавнего времени относительно небольшой и не превышала 10–12%, сегодня некоторые модели ФЭУ достигают 45%, однако в зависимости от покрытий, наносимых на фотокатод, спектральная чувствительность могла варьироваться в достаточно широком диапазоне спектра. Значительным преимуществом ФЭУ стала возможность вести наблюдения с высоким временным разрешением (вплоть до 0,1 наносекунды). На сегодняшний день ФЭУ в качестве одноэлементных устройств для подсчета фотонов сменили сцинтиблоки на основе кремниевых фотодиодов, свободные от многих недостатков ФЭУ и имеющие квантовую эффективность вплоть до 80%.

Настоящая революция в астрономии произошла с изобретением в 1969 году приборов с зарядовой связью (ПЗС, английская аббревиатура – CCD). ПЗС – это, как правило, матрица или линейка, организованная на полупроводниковой кремниевой пластине. Каждый элемент изображения, пиксел, локализуется на поверхности пластины с помощью системы электродов, удерживающих образовавшиеся в результате фотоэффекта свободные электроны в своих пределах и не позволяющих им перемещаться в соседние пиксели. Таким образом, фотоны, попадающие на поверхность ПЗС, порождают электроны, которые накапливаются в пределах пиксела. По окончании экспозиции накопленный заряд в каждом из пикселов сдвигается в соседний по направлению к регистру считывания и предварительному усилителю, находящемуся на самой кремниевой пластине, усиленный сигнал подается на АЦП, результаты измерения которого поступают непосредственно в компьютер.

Теперь наблюдатель может видеть результат своей работы практически сразу после окончания экспозиции. Квантовая эффективность ПЗС заметно выше ранее используемых приемников и составляла десятки процентов для ранних ПЗС, а сегодня достигает 90–95% для широкого диапазона длин волн 450–800 нм. К 1980-м годам ПЗС стали широко использоваться в наземных и космических астрономических приборах. Размер пиксела ПЗС, как правило, составляет от 4 до 30 мкм, емкость единичного пиксела – от 25 000 до 1 000 000 электронов. В отличие от фотопластинок, использовавшихся в астрономии, площадь монолитной ПЗС-матрицы обычно небольшая – сегодня наиболее крупные ПЗС-матрицы имеют размеры 9×9 см и содержат до 10^8 пикселов. Поэтому переход от фотографии к ПЗС-камерам на телескопах, сконструированных для применения фотографических пластин, нередко приводил к заметному сокращению поля зрения. В дальнейшем были разработаны крепежные системы кремниевых пластин ПЗС, позволяющие устанавливать на единое основание мозаику из ПЗС-матриц, поперечный размер которой в некоторых проектах достигает 60 см.

Система электродов, расположенная на лицевой стороне кремниевой пластины ПЗС-матрицы (ПЗС с прямой засветкой) ограничивала максимальную квантовую эффективность, т. к. фотоны, попадающие на электроды, терялись, отражаясь в обратном направлении. Для устранения этой проблемы были изготовлены ПЗС с обратной засветкой, у которых электроды были расположены на тыльной стороне пластины, а ее толщина была уменьшена до 15–40 мкм.

Помимо фотоэлектронов, попадающих в ловушки электродов пиксела, во время экспозиции туда же попадают так называемые тепловые электроны, создающие тепловой шум. Для уменьшения влияния теплового шума при длительных экспозициях астрономические ПЗС-камеры содержат в себе систему охлаждения: ПЗС располагается в вакуумированной или наполненной инертными газами камере, а позади приемника находится либо пельтье-элемент, либо емкость, заполненная жидким азотом. Научные камеры работают, как правило, при температуре ПЗС-матрицы близкой к 180 К.

Помимо теплового шума, при считывании ПЗС дополнительный шум генерируется усилителем сигнала, установленным перед АЦП, типичные величины шума чтения составляют от 2 до 20 электрон на пиксель. Таким образом, динамический диапазон современных ПЗС-камер может быть до 1:150 000.

Дальнейшее развитие технологий принесло астрономам еще более чувствительные приборы – EMCCD (или L3CCD). Дело в том, что шум чтения возрастает пропорционально скорости оцифровки значений каждого пиксела, типичные частоты позволяющие на современных ПЗС получить низкий шум чтения составляют 50–100 кГц, поэтому для полной оцифровки изображения нередко требуется время, превышающее время самой экспозиции. Для минимизации

времени считывания крупные ПЗС стали оснащаться несколькими выходными усилителями, каждый из которых усиливал сигнал со своего сектора ПЗС. Однако необходимость в матричных приемниках позволяющих детектировать свет на уровне отдельных фотонов и при этом производить до нескольких кадров в секунду привела к созданию матриц со встроенными структурами многоканальных усилителей, располагающихся непосредственно в структуре пикселов и позволяющих производить значительное усиление сигнала до передачи его на АЦП. За счет статистики такие приемники обладают шумами чтения не превышающими 1e при частотах оцифровки более 1 МГц. Размеры их пока невелики, до 1024×1024 пиксела, однако в последние годы появились инженерные образцы с разрешением до 16 мегапикселов. За все, однако, надо платить. В EMCCD при работе в «малошумящем режиме» начинает преобладать фотонный шум, что усложняет регистрацию предельно слабого сигнала.

Параллельно с развитием ПЗС, все большее распространение получают в астрономии матричные приемники типа CMOS. Основным их отличием является более сложная структура пиксела, который помимо светочувствительной зоны содержит предварительный усилитель, а считывание отдельных блоков пикселов может производиться независимо. Непосредственно на кристалле приемника располагается и массив из нескольких АЦП, которые параллельно ведут оцифровку сигнала из разных пикселов. Эта конструкция позволила существенно повысить скорость оцифровки.

Технология CMOS долгое время развивалась применительно к ИК-матрицам, её применение для оптического диапазона ограничивала невысокая чувствительность, т.к. сложная структура электродов и транзисторных усилителей на поверхности пластины занимала значительную площадь, и соответственно приемник имел низкую квантовую эффективность. Появление субмикронных литографических процессов и применение технологии обратной засветки (по аналогии с ПЗС) позволили создать новые модели широкоформатных sCMOS-матриц, обладающих высокой квантовой эффективностью (до 93 %), низкими шумами чтения, адаптированных для охлаждения в целях понижения теплового шума, и частотами считывая до нескольких десятков кадров в секунду.

Благодаря своей архитектуре CMOS-матрицы обладают существенно меньшим энергопотреблением, в сравнении с ПЗС, что делает их востребованными для использования на космических аппаратах.

Методы исследования в оптическом диапазоне

Если на начальном этапе развития астрономии преобладали визуальные наблюдения, то с началом использования в астрономии фотоприемников и развитием астрофизики наиболее востребованными стали методы многоцветной фотометрии и спектроскопии.

Фотометрия

Задачей оптической фотометрии является измерение яркости небесных объектов в видимой области спектра. Величины блеска и цвета звезд и галактик позволяют определить их физические свойства и состав. В некотором смысле фотометрия представляет собой форму спектрального исследования с очень низким разрешением, поскольку она измеряет спектр источников в нескольких диапазонах определяемых кривыми пропускания используемых фильтров. Однако, т.к. количество света, приходящего от далеких объектов крайне мало, фотометрия позволяет дать оценку для наиболее далеких или слабых объектов, спектроскопические исследования которых потребуют экстремально больших телескопов либо слишком продолжительных экспозиций. Кроме того, производя фотометрические наблюдения на панорамных приемниках, астрономы получают одномоментно информацию практически обо всех объектах, попадающих в поле зрения.

Выбор полос пропускания фильтров диктуется астрофизическими особенностями, представляющими интерес для исследователя, что породило многие десятки, если не сотни, различных фотометрических систем. Среди них есть т.н. широкополосные системы, полуширина пропускания фильтров которых составляет до нескольких сотен нанометров, среднеполосные – с полушириной до десятков нанометров и узкополосные, которые, как правило, выделяют необходимые исследователю отдельные спектральные линии и имеют ширину в несколько нанометров.

Звездная величина объекта в астрономии определяется как:

$$m = m_0 - 2{,}5\lg(E/E_0),$$

где m_0 и E_0 – звездная величина и освещенность, создаваемая источником, принимаемым за нуль-пункт. В астрономии, как правило, таким источником является Вега – звезда нулевой звездной величины, имеющая спектральный класс A0. От звезды нулевой величины приходит 10^6 фотонов в секунду на 1 см^2 Земли в спектральной полосе V, пик пропускания которой близок к максимуму чувствительности человеческого глаза. Таким образом, при изменении блеска на 5 звездных величин поток ослабевает в 100 раз.

Фотометрическая система описывается как совокупность кривой реакции приемника излучения, кривой пропускания фотометрических фильтров системы и стандартных звезд с определенными звездными величинами и показателем цвета. Важность метода фотометрических наблюдений в первую очередь демонстрируется наглядностью диаграмм цвет–величина, представляющих зависимость абсолютной величины в одной из фотометрических полос от показателя цвета, т.е. разности звездных величин в фильтрах с меньшей и большей центральной длиной волны (рис. 7).

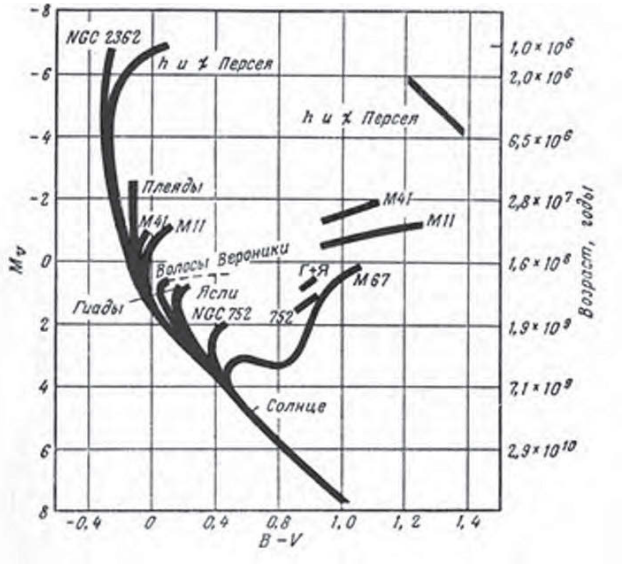


Рис. 7. Пример составной диаграммы цвет–величина для рассеянных звездных скоплений

Наибольшее распространение получила фотометрическая система Джонсона, которая была первоначально определена для комбинации чувствительного в синем диапазоне фотоэлектронного умножителя и трех наборов цветных стекол составлявшие три фильтра: U (УФ), B (синий) и V (зеленый или визуальный). С появлением новых ФЭУ, чувствительных в красной области, были добавлены еще два фильтра: R (красный) и I (ближний ИК). Они имели несколько вариантов пропускания и в дальнейшем в зависимости от версии помечались нижним индексом для устранения недоразумений.

В начале 2000-х годов получила широкое распространение фотометрическая система SDSS, впервые примененная для Слоановского обзора неба в котором были с высокой точностью измерены звездные величины в пяти фильтрах (u', g', r', i', z') около пятисот миллионов звезд и галактик. Центральные длины волн фильтров системы SDSS близки к Джонсоновской системе, однако зоны наложения кривых существенно уменьшены.

В качестве примеров фотометрических систем можно привести систему, используемую на камере WFPC2 космического телескопа имени Хаббла, в частности, пять фильтров которой (F336, F439, F555, F675 и F814) во многом совпадают с системой UBVRI, однако для получения точного результата необходимо принимать во внимание различия кривых пропускания фильтров и чувствительность приемников.

Для проекта J-PAS выбрана узкополосная система, состоящая из 56 фильтров, равномерно покрывающих диапазон длин волн от 370 до 920 нм. Целями обзора J-PAS, который ведется на специально построенном 2,5-метровом широкопольном телескопе стали задачи: массового определения красного смещения галактик на расстояниях до $z \sim 1$, изучение структуры звездных популяций в ближайших галактиках и изучение спектральных особенностей активных ядер галактик и сверхновых звезд.

Спектроскопия

Появление спектральных методов исследования в астрономии стало, по сути, отправной точкой развития астрофизики. Если до второй половины XIX века преобладало мнение, что человечество никогда не сможет узнать химический состав небесных тел и физические условия на них в силу огромной удаленности объекта, то после систематических исследований спектральных линий химических элементов немецким физиком Густавом Кирхгофом и химиком Робертом Бунзеном ситуация кардинально изменилась. Была установлена связь между линиями в спектре Солнца и линиями излучения паров различных веществ.

В дальнейшем это революционное исследование позволило узнать состав многих космических объектов и даже обнаружить новые химические элементы в Космосе, лишь впоследствии найденные на Земле. Спектральный анализ позволил определить химический состав, температуру, плотность вещества не только звезд и планет, но и исследовать характеристики межзвездного вещества. С совершенствованием спектральных приборов он стал применяться для определения лучевых скоростей наблюдаемых источников по эффекту Доплера. Исследования профилей линий в спектре позволило определять скорости движения газа и индукцию магнитного поля на поверхности звезд.

Спектральные исследования производятся с помощью двух основных методов: разложение света исследуемого объекта с помощью диспергирующих элементов (призма, дифракционная решетка, эшелле), направляющих свет с различными длинами волн по различным направлениям, и путем восстановления спектра из наблюдений, полученных с помощью сканирующего интерферометра Фабри–Перо (Фурье-спектрометра).

Наибольшее распространение в астрономии получили дифракционные спектрографы, где изображение исследуемого источника в фокальной плоскости объектива телескопа помещается на щель спектрографа, расходящийся за щелью пучок света перехватывает коллиматор, делая его параллельным. Далее располагается дифракционная решетка, которая может быть как зеркальной, так и пропускающей. Дифракционная решетка раскладывает свет по длинам волн, а объектив камеры на поверхности приемника образует совокупность монохроматических изображений щели, то есть спектр исследуемого источника.

Важной функцией коллиматора является построение выходного зрачка, в котором и должен располагаться диспергирующий элемент). Выходной зрачок — это изображение входной апертуры телескопа или место, в котором пересекаются оси всех пучков вошедших в телескоп под разными углами. Принципиально важно при работе с длинной щелью, чтобы лучи от всех участков щели проходили через один и тот же участок диспергирующего элемента, т. е. находились в равных условиях.

Оглавление

Предисловие редактора 5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЛНЫ 9

Оптический диапазон (А. А. Белинский, С. А. Потанин) **9**

Введение. 9

История оптического телескопостроения. 10

Приемники оптического излучения 15

Методы исследования в оптическом диапазоне 18

Методы наземных наблюдений в оптическом диапазоне с высоким угловым разрешением 23

Современные крупные оптические телескопы 27

Обзорные телескопы 32

Роботизированные телескопы 34

Проекты наземных оптических телескопов, вводимых в строй в ближайшем будущем 35

Космические оптические телескопы 37

Инфракрасная астрономия (А. М. Татарников) **39**

Введение. 39

Поддиапазоны инфракрасного диапазона 41

Инфракрасное излучение и атмосфера Земли 42

Инфракрасные фотометрические системы. 44

Приёмники инфракрасного излучения 46

Инфракрасные приборы. 50

Инфракрасные телескопы. 52

Космические инфракрасные телескопы. 54

Объекты исследования 59

Радиодиапазон (Ю. Ю. Ковалев) **65**

Что такое радиодиапазон электромагнитного спектра? 65

Радиотелескопы с заполненной апертурой 66

Радиотелескопы с незаполненной апертурой: радиоинтерферометры. 69

Приемники радиоизлучения 74

Помехи и борьба с ними 76

Будущее радиоастрономии 78

Рекомендуемая литература. 80

Ультрафиолетовый диапазон (Б.М. Шустов) **81**
Что такое «ультрафиолетовая астрономия» 81
Почему так важны астрофизические наблюдения в УФ 84
Достижения УФ-астрономии и перспективные задачи 88
О развитии, состоянии и перспективах методов УФ-наблюдений в астрофизике 94
Рентгеновская астрономия (А.А. Лутовинов, М.Н. Павлинский) **99**
Первые наблюдения неба в рентгеновских лучах 100
Начало эры спутниковых измерений в рентгеновских лучах 102
Рентгеновские телескопы косого падения 104
Рентгеновские телескопы с кодирующей апертурой 109
Новые шаги рентгеновской астрономии 116
Гамма-астрономия (К.А. Постнов) **119**
Введение 119
Рождение гамма-фотонов высоких энергий 120
Гамма-спектроскопия 122
Распространение гамма-фотонов 125
Гамма-телескопы и детекторы 127
Заключение 134
НЕЙТРИННЫЙ КАНАЛ **135**
Источники и регистрация нейтрино (С.В. Троицкий) **135**
Введение 135
Нейтрино как частица 135
Солнечные нейтрино и радиохимический метод 143
Нейтрино от сверхновых и детекторы на жидких сцинтилляторах 150
Астрофизические нейтрино высоких энергий и водные черенковские детекторы 159
Будущее нейтринной астрофизики 170
Литература для дополнительного чтения 174
КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ **175**
Странники Вселенной (М.И. Панасюк) **175**
Введение 175
Атмосферные ливни космических частиц 177
Поймать космические лучи за пределами атмосферы 184
Галактические частицы и их ускорители 186
Самые энергичные частицы во Вселенной 192
Многолетние поиски эффекта ГЗК-обрезания 194
Энергетический спектр КЛПВЭ – известен? 195

Массовый состав КЛПВЭ – известен? . . . 197
Где источники КЛПВЭ? . . . 199
В космос за новыми знаниями о космических лучах . . . 201
Заключение . . . 204

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ . . . 205

Открытие гравитационных волн (С. П. Вятчанин) . . . **205**
Что такое гравитационные волны? . . . 207
Гравитационные антенны . . . 209
Величина измеряемых смещений . . . 212
Фотонный дробовой шум и шумы светового давления . . . 215
Тепловые шумы поверхности зеркал . . . 215
Шумы подвеса . . . 218
Сейсмические и ньютоновские шумы . . . 218
Стандартный квантовый предел . . . 219

Природа источников гравитационных волн (К. А. Постнов) . . . **221**
Отличие гравитационных волн от электромагнитных . . . 221
Лазерные интерферометры . . . 223
Гравитационные сигналы – «космические сирены» . . . 224
Слияние двойных черных дыр . . . 228
Первое слияние двойных нейтронных звезд . . . 230
Наблюдения «золотой» килоновой . . . 233
Другие астрофизические источники гравитационных волн . . . 234
Космологические гравитационные волны . . . 236

Локализация источника гравитационных волн (В. М. Липунов) . . . **239**
Машина сценариев . . . 242
Наблюдения гравитационно-волнового события GW150914 . . . 244
Почему первым открыто слияние черных дыр? . . . 244
Почему массы черных дыр оказались много больше, чем ожидалось? . . . 250
Нобелевская премия без наших соотечественников . . . 253
Обнаружение килоновой в галактике NGC4993 – первая локализация источника ГВ . . . 254
История нейтронных звезд . . . 256
Темп слияний нейтронных звезд в местной Вселенной . . . 257
Будущее . . . 262

Ограничения на физические теории, следующие из открытия ГВ (С. О. Алексеев) . . . **265**

Гравитационные сигналы Вселенной (В. Н. Руденко) **277**
Введение 277
Текущая фаза ГВ эксперимента 278
Ступени модернизации детекторов ЛИГО 279
Европейский проект «Телескоп Эйнштейна» 282
Космический детектор eLISA 285
Гравитационная интроскопия Вселенной 294
Заключение 299
Литература 300

АСТРОНОМИЧЕСКАЯ КАРТИНА МИРА **301**

Исследования планет (М. Я. Маров) **301**
Планеты Солнечной системы 301
Планеты земной группы 309
Планеты-гиганты 318
Спутники и кольца планет-гигантов 324
Малые тела 332
Экзопланеты 337
Вместо заключения 341
Дополнительная литература 342

Солнце – этапы познания (В. Н. Обридко) **343**
Введение 343
Основные данные 344
Становление физических исследований Солнца 346
Новая эпоха. Взгляд вглубь и наружу 356
Итак, что дальше? 370

Звезды и звездные населения (А. С. Расторгуев, А. К. Дамбис, Н. Н. Самусь) **375**
Звезды и созвездия 375
Астрометрические, фотометрические и спектральные наблюдения звезд 377
Диаграмма Герцшпрунга-Рассела,
классификация звезд и звездная эволюция 380
Химический состав звезд и особенности звездных населений 384
Так ли «просты» шаровые скопления? 389
Пульсирующие переменные звезды как «стандартные свечи» 391
Какие еще бывают переменные звезды 395

Сверхновые звезды и гамма-всплески (С. И. Блинников, Д. Ю. Цветков) . **399**
Сверхновые – наблюдения 400
Физика сверхновых 407
Литература для дальнейшего чтения 423

Многоликие галактики (А.В. Засов, О.К. Сильченко) **425**
Радиоизлучение галактик и активные ядра 432
Нейтральный водород в галактиках.. 435
Ультрафиолетовая фотометрия: GALEX 438
Ультрафиолетовая спектроскопия: COS/HST 440
Рентгеновские гало галактик 443
Ранние галактики с супервспышками звездообразования 445
Общий ход эволюции галактик как мы его себе представляем 448
Черные дыры (А.М. Черепащук) **451**
Введение 451
Удивительные свойства черных дыр 452
Черные дыры в рентгеновских двойных системах 459
Черные дыры в гравитационно-волновых двойных системах 466
Сверхмассивные черные дыры в ядрах галактик 478
Заключение 488
Космология (М.В. Сажин, О.С. Сажина) **489**
Космология и ее место в современной науке 489
Шесть основ современной наблюдательной космологии 491
Этапы эволюции Вселенной 508
Доинфляционная эпоха 515
Заключение (А.М. Черепащук) **519**
Авторский коллектив **520**