**Большие оптические телескопы будущего**

Б.М. Шустов, доктор физико-математических наук, Институт астрономии РАН

Основной объем знаний о Вселенной человечество почерпнуло используя оптические инструменты - телескопы. Уже первый телескоп, изобретенный Галилеем в 1610 году, позволил сделать великие астрономические открытия. Следующие столетия астрономическая техника непрерывно совершенствовалась и современный уровень оптической астрономиии определяется данными, полученными с помощью инструментов, в сотни раз превышающими по размерам первые телескопы.

Тенденция создания все более крупных инструментов особенно четко проявилась в последние десятилетия. Телескопы с зеркалом диаметром 8 - 10 м становятся обычными в практике наблюдений. Проекты 30-м и даже 100-м телескопов оцениваются как вполне осуществимые уже через 10 - 20 лет.

**Зачем их строят**

Необходимость построения таких телескопов определяют задачи, требующие предельной чувствительности инструментов для регистрации излучения от самых слабых космических объектов. К таким задачам относятся:

происхождение Вселенной;

механизмы образования и эволюции звезд, галактик и планетных систем;

физические свойства материи в экстремальных астрофизических условиях;

астрофизические аспекты зарождения и существования жизни во Вселенной.

Чтобы получить максимум информации об астрономическом объекте, современный телескоп должен иметь большую поверхность собирающей оптики и высокую эффективность приемников излучения. Кроме того, помехи при наблюдениях должны быть минимальны.

В настоящее время эффективность приемников в оптическом диапазоне, понимаемая как доля регистрируемых квантов от общего числа пришедших на чувствительную поверхность, приближается к теоретическому пределу (100%), и дальнейшие пути совершенствования связаны с увеличением формата приемников, ускорением обработки сигнала и т.д.

Помехи при наблюдениях - весьма серьезная проблема. Помимо помех природного характера (например, облачность, пылевые образования в атмосфере) угрозу существованию оптической астрономии как наблюдательной науки представляет нарастающая засветка от населенных пунктов, промышленных центров, коммуникаций, техногенное загрязнение атмосферы. Современные обсерватории строят, естественно, в местах с благоприятным астроклиматом. Таких мест на земном шаре очень мало, не более десятка. К сожалению, на территории России мест с очень хорошим астроклиматом нет.

Единственным перспективным направлением развития высокоэффективной астрономической техники остается увеличение размеров собирающих поверхностей инструментов.

**Крупнейшие телескопы: опыт создания и использования**

В последнее десятилетие в мире реализованы или находятся в процессе разработки и создания более десятка проектов крупных телескопов. Некоторыми проектами предусмотрено строительство сразу нескольких телескопов с зеркалом размером не менее 8 м. Стоимость инструмента определяется в первую очередь размером оптики. Столетия практического опыта в телескопостроении привели к простому способу сравнительной оценки стоимости телескопа S с зеркалом диаметром D (напомню, что все инструменты с диаметром главного зеркала больше 1 м - телескопы-рефлекторы). Для телескопов со сплошным главным зеркалом как правило S пропорционально D3. Анализируя таблицу, можно заметить, что это классическое соотношение для самых больших инструментов нарушается. Такие телескопы дешевле и для них S пропорционально Da, где a не превышает 2.

Именно потрясающее снижение стоимости и дает возможность рассматривать проекты сверхгигантских телескопов с диаметром зеркала в десятки и даже сотню метров не как фантазии, а как вполне реальные в недалеком будущем проекты. Мы расскажем о нескольких наиболее экономичных проектах. Один из них, SALT, вводится в строй в 2005 г., строительство гигантских телескопов 30-метрового класса ELT и 100-метрового - OWL , еще не начато, но, возможно, они появятся через 10 - 20 лет.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ТЕЛЕСКОП | Диаметр зеркала,  м | Параметры главного зеркала | Место установки телескопа | Участники проекта | Стоимость проекта, млн. $ USD | Первый свет |
| KECKI  KECK II | 10  10 | параболическое  многосегмент-ное активное | Mauna Kea, Гавайи, США | США | 94  78 | 1994  1996 |
| VLT  (четыре телескопа) | 4х8.2 | тонкое  активное | Paranal, Чили | ESO, кооперация девяти стран Европы | 200 | 1998 |
| GEMINI North  GEMINI South | 8  8 | тонкое  активное | Mauna Kea, Гавайи, США  Cerro Pachon, Чили | США (25%), Англия (25%), Канада (15%), Чили (5%), Аргентина (2,5%), Бразилия (2,5%) | 176 | 1998  2000 |
| SUBARU | 8.2 | тонкое  активное | Mauna Kea, Гавайи, США | Япония | 100 | 1998 |
| LBT (бинокулярный) | 2х8.4 | сотовое  толстое | Mt. Graham , Аризона, США | США, Италия | 75 | 2001 |
| HET(Hobby&Eberly) | 11 (реально 9.5) | сферическое  много-сегментное | Mt. Fowlkes , Texac, США | США, Германия | 13.5 | 1998 |
| MMT | 6.5 | сотовое  толстое | Mt. Hopkins , Аризона, США | США |  | 1998 |
| MAGELLAN  два телескопа | 2х6.5 | сотовое  толстое | Las Cаmpanas , Чили | США |  | 1999 |
| БТА САО РАН | 6.0 | толстое | Гора Пастухова, Карачаево-Черкесия | Россия |  | 1976 |
| GTC | 10 | аналог KECK II | La Palma , Канарские острова, Испания | Испания 51% | 112 | 2002 |
| SALT | 11 | аналог НЕТ | Sutherland , Южная Африка | Южно-Африканская Республика | 10 | 2005? |
| ELT | 35 (реально 28) | аналог НЕТ |  | США | 150-200 аванпроект | 2012? |
| OWL | 100 | сферическое  многосег-  ментное |  | Германия, Швеция, Дания и др. | Около 1000 аванпроект | 2020? |

Большой Южно-Африканский Телескоп SALT

В 1970-х гг. главные обсерватории ЮАР были объединены в Южно-Африканскую Астрономическую Обсерваторию. Штаб-квартира находится в г. Кейптауне. Основные инструменты - четыре телескопа (1.9-м, 1.0-м, 0.75-м и 0.5-м) - расположены в 370 км от города в глубине страны, на холме, возвышающемся на сухом плато Кару (Karoo).

В 1948 г. в ЮАР построили 1,9-м телескоп, это был самый большой инструмент в Южном полушарии. В 90-х гг. прошлого века научные круги и правительство ЮАР решили, что южно-африканская астрономия не может оставаться конкурентоспособной в XXI столетии без современного большого телескопа. Первоначально рассматривался проект 4-м телескопа, подобного ESO NTT (New Technology Telescope - Телескоп Новой Технологии) или более современному, WIYN, - на обсерватории Китт-Пик. Однако, в конце концов выбрана концепция большого телескопа - аналога установленного на обсерватории Мак-Дональд (США) телескопа Хобби-Эберли (Hobby-Eberly Telescope - HET). Проект получил название - Большой Южно-Африканский Телескоп, в оригинале - Southern African Large Telescope (SALT).

|  |  |
| --- | --- |
| Большой Южно-Африканский Телескоп (Southern Afriсan Lаrge Telescope - SАLT). Видны сегментированное главное зеркало (1), конструкции следящей системы (2) и инструментальный отсек (3). | Башня телескопа (SALT) БЮАТ. На переднем плане видна специальная юстировочная башня для обеспечения согласования сегментов главного зеркала. Фото автора. |

Стоимость проекта для телескопа такого класса весьма низка - всего 20 млн. долларов США. Причем стоимость самого телескопа составляет лишь половину этой суммы, остальное - затраты на башню и инфраструктуру. Еще в 10 млн. долларов, по современной оценке, обойдется обслуживание инструмента в течение 10 лет. Столь низкая стоимость обусловлена и упрощенной конструкцией, и тем, что он создается как аналог уже разработанного.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Хобби-Эберли Телескоп (HET) Мак-Дональдской обсерватории на горе Фолкс (Техас, США). По его аналогу создается Большой Южно-Африканский Телескоп (SALT). |

SALТ (соответственно и HET) радикально отличаются от предыдущих проектов больших оптических (инфракрасных) телескопов. Оптическая ось SALT установлена под фиксированным углом 35° к зенитныму направлению, причем телескоп способен поворачиваться по азимуту на полный круг . В течение сеанса наблюдений инструмент остается стационарным, а следящая система, расположенная в его верхней части, обеспечивает сопровождение объекта на участке 12° по кругу высот. Таким образом, телескоп позволяет наблюдать объекты в кольце шириной 12° в области неба, отстоящей от зенита на 29 - 41°. Угол между осью телескопа и зенитным направлением можно менять (не чаще чем раз в несколько лет), изучая разные области неба.

Диаметр главного зеркала - 11 м. Однако его максимальная область, используемая для построения изображений или спектроскопии, соответствует 9,2-м зеркалу. Оно состоит из 91 шестиугольного сегмента, каждый диаметром 1 м. Все сегменты имеют сферическую поверхность, что резко удешевляет их производство. Кстати, заготовки сегментов сделаны на Лыткаринском заводе оптического стекла, первичную обработку выполняли там же, окончательную полировку проводит (на момент написания статьи еще не закончена) фирма Кодак. Корректор Грегори убирающий сферическую аберрацию, эффективен в области 4?. Свет может по оптическим волокнам передаваться к спектрографам различных разрешений в термостатируемых помещениях. Возможно также установить легкий инструмент в прямом фокусе.

Телескоп Хобби-Эберли, а значит и SALT, разработаны, по существу, как спектроскопические инструменты для длин волн в интервале 0.35-2.0 мкм. SALT наиболее конкурентоспособен с научной точки зрения при наблюдении астрономических объектов, равномерно распределенных по небу или располагающихся в группах размером несколько угловых минут. Поскольку работа телескопа будет осуществляться в пакетном режиме (queue-scheduled), особенно эффективны исследования переменности в течение суток и более. Спектр задач для такого телескопа очень широк: исследования химического состава и эволюции Млечного Пути и близлежащих галактик, изучение объектов с большим красным смещением, эволюция газа в галактиках, кинематика газа, звезд и планетарных туманностей в удаленных галактиках, поиск и изучение оптических объектов, отождествляемых с рентгеновскими источниками. Телескоп SALT расположен на вершине, где уже размещены телескопы Южно-Африканской Обсерватории, приблизительно в 18 км к востоку от поселка Сазерленд (Sutherland) на высоте 1758 м. Его координаты - 20°49' восточной долготы и 32°23' южной широты. Строительство башни и инфраструктуры уже закончено. Дорога автомобилем из Кейптауна занимает приблизительно 4 часа. Сазерленд расположен далеко от всех главных городов, поэтому здесь очень ясное и темное небо. Статистические исследования результатов предварительных наблюдений, которые проводились более 10 лет, показывают, что доля фотометрических ночей превышает 50%, а спектроскопических составляет в среднем 75%. Поскольку этот большой телескоп прежде всего оптимизирован для спектроскопии, 75% - вполне приемлемый показатель.

Среднее атмосферное качество изображения, измеренное Дифференциальным Монитором Движения Изображения (DIMM), составило 0.9". Эта система, размещается немного выше 1 м над уровнем почвы. Отметим, что оптическое качество изображения SALT-0.6". Этого достаточно для работ по спектроскопии.

Проекты Чрезвычайно Больших Телескопов ELT и GSMT

В США, Канаде и Швеции разрабатывается сразу несколько проектов телескопов 30-м класса - ELT, MAXAT, CELT и др. Таких проектов не менее шести. По моему мнению, наиболее продвинутые из них - американские проекты ELT и GSMT.

Проект ELT (Extremely Large Telescope - Чрезвычайно Большой Телескоп) - более масштабная копия телескопа HET (и SALT), будет иметь диаметр входного зрачка 28 м при диаметре зеркала 35 м. Телескоп достигнет проницающей силы на порядок выше, чем у современных телескопов 10-м класса. Общая стоимость проекта оценивается примерно в 100 млн. долларов США. Он разрабатывается в Техасском университете (г. Остин), где уже накоплен опыт по созданию телескопа HET, Пенсильванском университете и обсерватории Мак-Дональд. Это наиболее реальный проект для осуществления не позднее середины следующего десятилетия.

Проект GSMT (Giant Segmented Mirror Telescope - Гигантский Сегментированный Зеркальный Телескоп) можно считать в какой-то степени объединяющим проекты MAXAT (Maximum Aperture Telescope) и CELT (California Extremely Lerge Telescope). Конкурентный способ разработки и проектирования таких дорогих инструментов чрезвычайно полезен и используется в мировой практике. Окончательное решение по GSMT еще не принято.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Гигантский Сегментированный Зеркальный Телескоп (GSMT). Его полноповоротное главное зеркало диаметром 35м ( фокальное отношение f/1) состоит из 618 сегментов, каждый размером примерно 120 см и толщиной 5 см, их максимальная асферичность 110 мкм ( как у телескопа Кека). Диаметр адаптивного вторичного зеркала 2 м ( фокальное отношение f/18.75). Использована схема - классический Кассегрен, а конструкция типа радиотелескопа обеспечивает сохранность формы зеркала. |

Телескоп GSMT существенно более совершенен, чем ELT, причем его стоимость составит около 700 млн. долларов США. Это намного выше, чем у ELT, что обусловлено введением асферичного главного зеркала, и планируемой полноповоротностью

**Ошеломляюще Большой Телескоп OWL**

Амбициознейший проект начала XXI в. - это, конечно, проект OWL (OverWhelmingly Large Telescope - Ошеломляюще Большой Телескоп). OWL проектируется Европейской Южной Обсерваторией как альт-азимутальный телескоп с сегментированным сферическим главным зеркалом и плоскими вторичными. Для исправления сферической аберрации вводится 4-элементный корректор диаметром около 8 м. При создании OWL используются уже наработанные в современных проектах технологии: активная оптика (как на телескопах NTT, VLT, Subaru, Gemini), позволяющая получить изображение оптимального качества; сегментация главного зеркала (как на Keck, HET, GTC, SALT), конструкции низкой стоимости (как на HET и SALT) и разрабатывается многоступенчатая адаптивная оптика ("Земля и Вселенная", 2004, № 1).

Ошеломляюще Большой Телескоп (OWL) проектируется Европейской Южной Обсерваторией. Его основные характеристики: диаметр входного зрачка - 100 м, площадь собирающей поверхности свыше 6000 кв. м, многоступенчатая система адаптивной оптики, дифракционное качество изображения для видимого участка спектра - в поле 30", для ближнего инфракрасного - в поле 2'; поле, ограниченное качеством изображения, допускаемым атмосферой (seeing), - 10'; относительное отверстие f/8; рабочий спектральный диапазон - 0.32-2 мкм. Телескоп будет весить 12.5 тыс. т.

Нужно отметить, что этот телескоп будет иметь огромное рабочее поле (сотни миллиардов обычных пикселей!). Сколько же мощных приемников можно разместить на этом телескопе!

Принята концепция постепенного ввода OWL в строй. Предлагается начать использовать телескоп еще за 3 года до заполнения главного зеркала. Планируется заполнить 60 м апертуру к 2012 г. (если финансирование откроется в 2006 г). Стоимость проекта - не более 1 млрд. евро (последняя оценка 905 млн. евро).

**Российские перспективы**

Около 30 лет назад в СССР построен и введен в эксплуатацию 6-м телескоп [БТА](http://www.sao.ru/Doc-k8/Telescopes/bta/descrip.html) (Большой Телескоп Азимутальный). Долгие годы он оставался крупнейшим в мире и, естественно, был гордостью отечественной науки. БТА продемонстрировал ряд оригинальных технических решений (например, альт-азимутальную установку с компьютерным ведением), ставших впоследствии мировым техническим эталоном. БТА по-прежнему мощный инструмент (особенно для спектроскопических исследований), но в начале XXI в. он уже оказался лишь во втором десятке крупных телескопов мира. Кроме того, постепенная деградация зеркала (сейчас его качество ухудшилось на 30% по сравнению с первоначальным) выводит его из числа эффективных инструментов.

|  |  |
| --- | --- |
|  | Большой телескоп Азимутальный Специальной астрофизической обсерватории РАН. Его главное зеркало диаметром 6 метров (фокусное расстояние 24 м) весит 42 т, масса подвижной части телескопа - 650 т, угловое разрешение - 0.6" (при использовании методов спекл интерферометрии - 0.02"). |

С распадом СССР БТА остался практически единственным крупным инструментом, доступным для российских исследователей. Все наблюдательные базы с телескопами умеренного размера на Кавказе и в Средней Азии существенно потеряли свою значимость как регулярные обсерватории в силу ряда геополитических и экономических причин. Сейчас начаты работы по восстановлению связей и структур, но исторические перспективы этого процесса туманны, и в любом случае потребуется много лет только для частичного восстановления утраченного.

Разумеется, развитие парка крупных телескопов в мире предоставляет возможность российским наблюдателям для работы в так называемом гостевом режиме. Выбор такого пассивного пути неизменно означал бы, что российская астрономия будет всегда играть только второстепенные (зависимые) роли, а отсутствие базы для отечественных технологических разработок приведет к углублению отставания, и не только в астрономии. Выход очевиден - коренная модернизация БТА, а также полноценное участие в международных проектах.

Стоимость крупных астрономических инструментов как правило, исчисляется десятками и даже сотнями миллионов долларов. Такие проекты, за исключением нескольких национальных проектов, осуществляемых богатейшими странами мира, могут реализовываться только на основе международной кооперации.

Возможности кооперации в строительстве телескопов 10-м класса появились в конце прошлого века, но отсутствие финансирования, а точнее государственного интереса к развитию отечественной науки, привело к тому, что они были потеряны. Несколько лет назад Россия получила предложение стать партнером в строительстве крупного астрофизического инструмента - Большого Канарского Телескопа (GTC) и еще более финансово привлекательного проекта SALT. К сожалению, эти телескопы строятся без участия России.