

Санкт-Петербургский государственный университет

В.Г.Горбацкий

Лекции по истории астрономии
Учебное пособие

Издательство Санкт-Петербургского
университета
2002

УДК

ВВК

Г 67

Рецензенты: член-корреспондент РАН В.К. Абалакин (ГАО РАН)
профессор В.В. Иванов (С.-Петербур. гос. ун-т)

Печатается по постановлению
Редакционно-издательского совета
С.-Петербургского государственного
университета

УДК

Горбацкий В.Г.

Г 67 **Лекции по истории астрономии:** Учеб. пособие.
СПб Изд. С.-Петербур. ун-та, ISBN 5-288-02819-2, с.

Курс «История астрономии» является обязательным для всех студентов астрономической специальности. Вместе с тем, этот курс не обеспечен современными учебными пособиями. В предлагаемых «Лекциях» история астрономии излагается как эволюционный процесс развития одной из важнейших естественных наук. Раскрывается роль астрономии в развитии культуры от неолита до наших дней.

Книга предназначена для астрономов, однако может быть рекомендована широкому кругу читателей, интересующихся историей мировой науки.

Тем. план 2002 г., №79

ББК

ISBN 5-228-02819-2

© В.Г. Горбацкий, 2002

© Издательство
С.-Петербургского
университета, 2002

Оглавление

Предисловие		3
Лекция I	Введение: место астрономии в системе естественных наук	4
Лекция II	Развитие культуры в постнеолитический период	12
Лекция III	Зачатки астрономии в 1-м тысячелетии до н. э. — Нововавилонское царство, Древняя Греция	21
Лекция IV	Астрономия в эллинистический период (323 г. до н. э. — 300 г. н. э.)	32
Лекция V	Астрономия в странах ислама (VIII — XIV века)	44
Лекция VI	Возрождение культуры и науки в Европе; возникновение университетов (XI — XV века)	53
Лекция VII	Астрономия в Европе в XVI веке. Обоснование Коперником гелиоцентрической системы мира	62
Лекция VIII	Новая астрономия (первая треть XVII века): законы Кеплера, телескопические наблюдения Галилея	73
Лекция IX	Прогресс наблюдательной астрономии в середине XVII — начале XVIII века	84
Лекция X	Открытие фундаментального свойства природы — всемирного тяготения	92

Лекция XI	Позиционная астрономия и небесная механика в XVIII веке	102
Лекция XII	Конец XVIII — начало XIX века: становление звездной астрономии	112
Лекция XIII	Достижения позиционной астрономии и небесной механики в 20 – 40-е годы XIX века	121
Лекция XIV	Физика в 40 – 80-е годы XIX века. Зарождение астрофизики	130
Лекция XV	Астрономия в последней трети XIX века	139
Лекция XVI	Астрономия в начале XX века	148
Лекция XVII	Астрономия между мировыми войнами (1920–1940 годы)	158
Лекция XVIII	Астрономия после второй мировой войны — до 60-х годов	169
Лекция XIX	Астрономия в 60 – 80-е годы XX века	180
Лекция XX	Состояние астрономии в конце XX века и тенденции ее развития	191
Список литературы		198

Предисловие

Существуют десятки книг, в которых освещаются те или иные вопросы истории астрономии. Одни из этих произведений имеют просветительский характер — в них рассказывается об отдельных выдающихся открытиях и достижениях в познании небесных светил, в других описываются жизнь и творчество видных астрономов. Немногочисленные книги учебного характера по истории астрономии или устарели, как, например, известная «История астрономии» А. Паннекука, либо не соответствуют положению, занимаемому историей астрономии в университетском астрономическом образовании.

Специализирующиеся в области астрономии студенты к тому времени, когда они приступают к изучению истории своей науки, уже обладают знаниями на уровне, достигнутом астрономией к концу XX века. На этот уровень они были подняты усилиями своих учителей, им не приходилось отыскивать пути и «карабкаться по горным тропам» к вершинам. По мнению автора, будущие исследователи должны быть осведомлены о том, в каких условиях и какими путями были достигнуты успехи их науки.

В предлагаемом кратком курсе лекций невозможно дать детальное описание результатов, полученных за многолетнюю историю науки. В нем сделана попытка раскрытия внутренней логики развития астрономии. Прогресс в науке возможен лишь тогда, когда для этого созрели условия. Даже гениальные догадки, не подтвержденные анализом и фактическим материалом, не составляют сущности науки и не должны занимать значительного места в ее истории. В какой мере автору удалось достичь поставленной цели, могут судить читатели.

Автор выражает глубокую признательность В. К. Абалакину, В. В. Витязеву, В. В. Иванову и Д. И. Нагирнеру за ценные замечания, которые были ими сделаны при ознакомлении с рукописью этой книги. Автор благодарен П. А. Тараканову за помощь в подготовке рукописи к печати.

Лекция I

Введение: место астрономии в системе естественных наук

Приступая к изучению истории астрономии, целесообразно составить предварительно представление о месте астрономии в системе наук и ее роли в культуре общества.

В ранние времена — вплоть до XIX века — перед астрономией стояли ограниченные задачи, касающиеся исследования светил, относящихся к Солнечной системе. Объекты, находящиеся вне Галактики, были недоступны для наблюдения, представления об устройстве Вселенной были чисто умозрительными. В современную эпоху — к началу XXI века — астрономия стала наукой, изучающей небесные тела и их системы во всем многообразии для выявления закономерностей пространственного распределения, кинематических и динамических свойств, строения и эволюции этих объектов. Предметом истории астрономии является раскрытие процессов ее формирования как науки во взаимосвязи с происходившими изменениями общественной жизни и культуры.

Астрономия относится к естественным наукам, поэтому ее прогресс в значительной степени обусловлен достигнутым в тот или иной период уровнем других областей естествознания. Цель естественных наук — установление так называемых «законов природы» и познание мира, управляемого этими законами.

Любая наука представляет собой эволюционирующую открытую систему, «погруженную» в общество и многими путями взаимодействующую с ним. Совокупность наук сама по себе является сложной системой более высокого порядка, которая в свою очередь входит в качестве подсистемы в культуру человечества.

Под культурой понимается совокупность выработанных в человеческом обществе методов обеспечения жизнедеятельности людей — удовлетворения их материальных и духовных потребностей, изготовления необходимых для реализации этой цели вещей, а также организации общества. В культуре тесно переплетены две ее формы — материальная и духовная. Без духовной невозможно совершенствование и материальной культуры. Так, например, при создании книги, постройке дома и т. п. необходимо взаимодействие обеих форм культуры. Вместе с тем соотношение их в человеческой деятельности на различных этапах развития той или иной общественной формации неодинаково.

После того как достигнут достаточно высокий уровень культуры в обществе, для удовлетворения материальных потребностей общества становятся необходимыми научные знания о природе. Научные усилия затрачиваются на то, чтобы через понимание природных явлений организовать жизнедеятельность в окружающем человека мире. В дальнейшем эволюция науки происходит по ее собственным законам, хотя при этом на ней сказываются внешние экономические и политические обстоятельства. Они обуславливают ускорение или замедление прогресса в общественной формации и соответственно определяют отношение общества к научным исследованиям. Эти общие положения в полной мере относятся и к астрономии, что будет показано в ходе изложения ее истории.

Развитие не только науки, но и других областей культуры представляет собой сложный процесс, определяемый многими факторами. К важнейшим из них можно отнести следующие:

- а) внешние условия жизни, связанные главным образом с особенностями среды обитания (географический фактор);
- б) особенности формирования структуры общества и его традиции (исторический фактор);
- в) влияние контактов с другими культурами (степень открытости общества).

Характерным примером общества, в котором развитие культуры определялось в значительной мере благоприятными географическими условиями, являлась Вавилония — теплый климат, наличие водных ресурсов, плодородная почва. Важную роль играли также контакты с Индией и средиземноморскими культурами. В отличие от Вавилонии Япония развивалась изолированно, и там сформировалась во многих отношениях иная, чем в соседних странах, культура.

Достаточно развитым сообществам как одна из составляющих духовной культуры свойственна идеология — совокупность представлений, созданных той или иной группой и используемых в целях обеспечения власти

над членами сообщества и унификации общества. Понятие идеологии не совпадает с понятием мировоззрения, которое является особенностью индивидуума и формируется воспитанием, условиями жизни, образованием и другими обстоятельствами. Идеология может сильнее всего сказываться на культуре и отношении к науке. Наиболее распространенный вид идеологии — религия. В древности астрономические знания обычно использовались служителями религии для укрепления своего влияния в обществе.

Необходимость совершенствования технологии материального производства на основе научных знаний делает науку востребованной в любом структурированном обществе. Технология нужна не только для создания предметов материальной культуры, но и для использования свойств природы в интересах общества. Это не означает, что следует «покорять природу», как считали некоторые философы. Например, по утверждению М. Хайдеггера «ученый, как и технолог, всего лишь игрушка в руках воли к власти, замаскированной под жажду знания»¹. Такая точка зрения представляется крайне упрощенной, а следование ей — попытки покорить природу — приводило и приводит к негативным последствиям. Человечество является частью природы, поэтому усилия ученых должны быть направлены не на подчинение природы, а на познание ее законов с тем, чтобы на их основе организовать жизнедеятельность общества в окружающем мире. По выражению К. Пирсона «законы природы мы понимаем как описания, а не предписания»². Сформулированные людьми закономерности всегда остаются в той или иной мере субъективными — «справедливыми в определенный момент времени и в определенном месте»³.

Можно полагать, что познание природы (в примитивной форме) началось с образованием первых человеческих сообществ, то есть в раннем каменном веке (палеолите). Непосредственных свидетельств о духовном мире людей палеолита и тем более об их астрономических познаниях не имеется, хотя по этому поводу и высказывались различные предположения. Так, например, отмечалось, что первобытные люди могли определять направление север–юг и ориентироваться по небесным светилам. Однако имеющиеся археологические данные позволяют изучать историю возникновения науки лишь начиная с неолита и бронзового века.

Конец эпохи неолита (7 – 5-е тысячелетия до н.э.) ознаменовался так называемой неолитической революцией. До нее деятельность человеческих общин ограничивалась собирательством естественных ресурсов — съедобных растений, охотой и рыболовством, то есть восприятие природы было пассивным. В результате «организации природы» путем развития земле-

¹Heidegger M., *The Question Concerning Technology*, 1977

²Pearson K., *Grammar of Science*, 1892

³Needham J., *Science and Society in East and West*, 1969

делия и животноводства роль человека по отношению к окружающей его природной обстановке стала активной. Для осуществления этого нужны были знания, которые черпались из повседневного опыта. Таким путем возникала эмпирическая наука, заключающаяся в то время лишь в обобщении опыта, и на ее основе создавалась технология.

Переход к конкретной форме хозяйственной деятельности обуславливался характером среды обитания. Так, в Месопотамии и Египте теплый климат и возможности орошения и удобрения почвы позволяли собирать хорошие урожаи зерновых, поэтому живущие там народы занимались преимущественно земледелием. При занятиях земледелием требуется оседлый образ жизни, и поэтому возникают стабильные поселения. Укрупнение этих поселений приводило к образованию городов.

Городским цивилизациям свойственно более быстрое, чем для кочевых сообществ, развитие культуры. Правитель («царь») города или области строил пышные дворцы, украшая их произведениями искусства. Господствовавшая в духовной жизни религия стимулировала строительство грандиозных храмов. Рост городов приводил к расширению торговых связей, что в свою очередь вызывало необходимость строительства дорог. Ремеслами занимались преимущественно в городах, что способствовало развитию там технологий и стимулировало потребность в знаниях.

Появление начальных сведений по математике и астрономии связано в первую очередь с хозяйственной деятельностью. Для регулирования сельскохозяйственных работ необходим календарь, по которому должны устанавливаться сроки посева и уборки урожая. Для составления календарей требуются долговременные наблюдения за небесными светилами. Неизменное и недоступное небо считалось областью идеального, а значит и обиталищем богов. Поэтому жрецы, «узнававшие от богов» их волю и сообщавшие ее правителям и народу, стали первыми наблюдателями небесных явлений. По своим наблюдениям они устанавливали закономерности движения небесных тел. Таким образом, возникновение астрономии как науки было вызвано духовными (религия) и практическими (земледелие) потребностями общества. Для ведения учета хозяйственной деятельности (не только земледелия) нужно было создать систему счета, положившую начало математике, в которую вошли и элементы геометрии, необходимые при организации землепользования.

Письменность появилась в процессе неолитической революции как средство распространения и хранения информации. Сначала для этих целей служили упрощенные рисунки, символизирующие различные события — т. н. пиктографическое письмо (как его пример можно назвать наскальную живопись). Оно совершенствовалось, переходя сначала в знаковую (иероглифическую) форму, а затем — в алфавитную. Создание письменности ускорило развитие культуры.

Те общественные структуры, существование которых обеспечивалось скотоводством и охотой, не смогли получить сколько-нибудь значительных сведений о небесных явлениях, поскольку в них не производились долговременные наблюдения неба. Отставали они от городских (земледельческих) цивилизаций и в других областях культуры. Тем не менее, нельзя исключить, что при контактах с представителями более развитой культуры эти сообщества могли воспринять начатки научных знаний. В частности, вполне возможно, что им в своих странствиях приходилось ориентироваться по небесным светилам.

В древности, а в какой-то мере и в средние века, науки о природе имели метафизический характер. В соответствии с религиозными представлениями природа создана богом, остается в своей сущности неизменной и управляется «божественным провидением». Но уже в античную эпоху некоторые философы разделяли мир на «божественный», где ничего не меняется, и человеческий, подверженный изменениям, где одно возникает, другое уничтожается. Они стали искать «естественные» причины таких изменений, оставляя за богами, так сказать, «общее руководство». В этом отношении дальше всех пошел Аристотель (384–322 гг. до н. э.), стремившийся познать причины всех земных вещей, но не касавшийся богов. Вместе с тем ему принадлежат фантастические, не имеющие ничего общего с действительностью высказывания о строении мира.

Ученые более позднего (эллинистического) периода, не касаясь по возможности религиозных догм, производили систематические наблюдения неба, определяя положения и видимые движения небесных светил. На основе наблюдений создавались каталоги звезд, модели движений планет, Солнца и Луны и эфемериды для этих светил на длительные сроки. Эта деятельность обеспечивала развитие навигации.

Созданные в первые века новой эры культура и наука, включая астрономию, были разгромлены религиозными фанатиками. Нашествия кочевников на Европу в первой половине тысячелетия окончательно разрушили Римскую империю, а с ней и античную культуру, остатки которой частично сохранились лишь на периферии Ойкумены и в некоторых соседних странах, например в Индии.

На исторической сцене в VII веке появилась новая идеология — ислам. Учение ислама быстро распространилось на обширные территории — от Средней Азии до Испании. Там возник ряд более или менее самостоятельных государств. Сторонники ислама считают волю Аллаха определяющей все происходящее в мире. Несмотря на крайний религиозный догматизм, в культуре исламских государств многие знания по астрономии и математике, приобретенные в античную эпоху, не только сохранялись, но и продолжали совершенствоваться. Столь парадоксальное положение объясняется, с одной стороны, спецификой религии, нуждавшейся в очень точных

определениях видимых движений небесных тел и, с другой стороны, необходимостью совершать далекие путешествия как по суше, так и по морям, связанной с активным товарообменом между странами.

Благодаря относительной веротерпимости ислама к научной деятельности привлекались и ученые, принадлежавшие к другим конфессиям. Через них информация о достижениях арабской астрономии распространялась по тем европейским государствам, которые достигли достаточно высокого уровня культуры.

В начале второго тысячелетия Западная Европа стала выходить из духовного мрака, спустившегося на нее после падения Рима. Поднималась экономика, развивались земледелие, ремесла, торговля. Техническому прогрессу способствовало использование сохранившихся элементов культуры античности в условиях создававшегося городского быта.

Как уже отмечалось, с развитием материальной культуры создавались новые технологии, особенно в области способов ведения войн, которыми изобиловало средневековье. Естественно, появилась и заинтересованность в научных знаниях — по крайней мере, в тех областях, которые не касались религиозных догм. Эпоха Возрождения (XIV – XVI вв.) выдвинула крупных деятелей духовной культуры — искусства, литературы и науки. Отношение к науке начало изменяться — даже католическая церковь признала роль разума в познании окружающего мира. По утверждению одного из «отцов церкви» Фомы Аквинского (XII в.), «откровение в вере, разум в познании».

Основание университетов во многих частях Европы, подготавливавших, в отличие от монастырских школ, широко образованных людей, свидетельствовало об изменении взгляда церкви и власти на образование. В университетах преподавалась также астрономия, хотя лишь по основанным на геоцентрической системе мира трудам античных ученых и философов.

Перемены в отношении общества к ремесленникам (новаторам) и промышленникам, обеспечивающим возрастающие жизненные потребности, сказались и на положении науки. Как точно подмечено выдающимся ученым И. Пригожиным (1917 г.р.), «предприимчивое европейское меркантильное общество оказалось благоприятной средой для стимулирования и поддержания динамичного роста современной науки на данных стадиях ее развития»⁴.

В Англии, которая несколько раньше других европейских стран вступила на путь промышленного развития, необходимость совершенствования технологии привела к появлению нового метода научных исследований — эмпиризма. По утверждению философа Роджера Бэкона (1212–1292), знания получают из опыта. Это означает, что через активный опыт устанав-

⁴Пригожин И., Стенгерс И., *Порядок из хаоса*, 1984

ливаются диалог с природой, т. е., предполагается получение от нее ответа («сигнала») на вопрос, поставленный опытом, подтверждающего, дополняющего или отрицающего существующие теоретические представления. Физика возникла в XVI – XVII веках как наука, занимающаяся исследованием природы методом активного эксперимента. По результатам экспериментов устанавливаются закономерности природных явлений.

Астрономию иногда рассматривают как часть физики, что не вполне соответствует данному выше определению. У астрономии как науки есть существенные особенности:

1. Невозможность постановки активного эксперимента над небесными объектами (во второй половине XX века это ограничение было частично снято в отношении тел, принадлежащих Солнечной системе).
2. Исследуемые астрономией явления имеют настолько большие масштабы, что их невозможно воспроизвести в земных условиях.
3. Гораздо более сильное, чем других естественных наук, влияние астрономии на духовную культуру общества.

Развитие физики и других точных наук до современного уровня было бы невозможным без астрономии. Таким образом, она является одной из фундаментальных наук, в свою очередь опирающейся на физику и математику.

Сложные ситуации, возникавшие в истории астрономии, в значительной мере были обусловлены ее ролью в формировании мировоззрения людей. Это проявлялось, в частности, в вопросе об устройстве Вселенной.

На ранних этапах развития астрономии наиболее отчетливо выражалась ее связь с механикой. Механика началась с математической формулировки законов движения Галилео Галилеем. Над разработкой теоретических проблем механики в дальнейшем трудились многие выдающиеся ученые, и небесная механика, созданная И. Ньютоном, является одной из важнейших частей механики. До XIX века в астрономии господствовала механистическая система мира, основывавшаяся на регулярности движения светил и уподоблявшая Вселенную идеальным часам, схожим по точности с теми механизмами, которые изготавливались мастерами в XVI – XVII веках. Оставались вопросы о том, кто изготовил и завел «мировые часы», как поддерживается их действие. Не только в средневековье, но и в более поздние времена эту деятельность связывали с богом — или явно, или подсознательно. Создатели механистической системы мира избегали вопроса об источнике — начале — движения, игнорируя саму идею эволюции Вселенной. В результате вся картина становилась метафизичной, не исторической. Подобное положение соответствовало характерному для XVII – XVIII веков образу мышления — эпохе начала машинной цивилизации в Европе и уровню культуры общества.

В XIX веке появились машины, использовавшие тепловую энергию для создания движения — механической энергии. Вместе с тем, возникшая новая область физики — термодинамика — продемонстрировала недостаточность механической картины мира. В астрономии стала укореняться идея о необходимости эволюции, в это время ярко проявившаяся в биологии. В связи с этим встал вопрос об источниках энергии, излучаемой Солнцем и звездами. Проблемы астрономии стали рассматриваться в более реалистических пространственных и временных масштабах. Представление о строении мира стало иным в результате революционных изменений в методах астрономии — совершенствовании телескопов, применении спектрального анализа, фотографии и точных приборов.

Еще более радикальные перемены произошли в астрономии в XX веке. После создания общей теории относительности и квантовой механики — открытий, преобразивших физику и астрономию, пришлось пересматривать многие положения классической науки. Благодаря техническому прогрессу, основанному на достижениях физики и способствовавшему созданию совершенно новых способов наблюдений, астрономия XX века стала всеволновой, что привело к важнейшим открытиям.

Выдающиеся достижения астрономии XX века, о которых будет рассказано в дальнейшем, отразились и на развитии физики. Например, данные космологии о начальных этапах развития Вселенной существенно используются в теории элементарных частиц. В целом в конце XX века место астрономии в системе естественных наук как неотъемлемой ее составляющей еще более укрепилось. Здесь уместно привести высказывание специалиста по истории науки О. Нейгебауэра⁵. Отмечая, что изучение связей между математической и астрономической теориями часто шло параллельно истории искусства, религии, алхимии и многих других областей, он объясняет это внутренним единством человеческой культуры. И далее говорит о роли астрономии: «Роль астрономии может быть исключительной лишь постольку, поскольку она несет в своем медленном, но неуклонном прогрессе корни наиболее решающего события в человеческой истории — создания современных точных наук». Обоснованием столь сильного утверждения должно стать содержание данного курса лекций.

⁵О. Нейгебауэр, *Точные науки в древности*, М., 1968

Лекция II

Развитие культуры в постнеолитический период

Неолитическая революция происходила на территории Юго-Западной Азии в долинах рек Тигра и Евфрата (так называемое Двуречье, рис. 1), Северной Африки (долина Нила), Индии (долины Инда и Ганга) и Китая (долина Хуан-Хэ) более или менее одновременно — примерно в 6 – 5-м тысячелетиях до н. э. Долины осваивались по мере высыхания болот. Заселение земель в значительной мере определялось изменениями климата, обусловленными сменой направления атлантических циклонов при окончании оледенения. При этом отыскивались места, пригодные для земледелия — с достаточными водными ресурсами и большим числом солнечных дней. Несколько позже, в 4 – 3-м тысячелетиях до н. э., сходная революция произошла в областях Средиземноморья и Центральной Европы (включая Британские острова), до этого заселенных племенами охотников.

Рис. 1. Схематическая карта Месопотамии и прилегающих территорий (III – II тысячелетия до н. э.).

Археология дала много сведений о материальной культуре неолита и эпохи бронзы. Однако судить по этим данным о духовной стороне жизни того времени трудно. Что же касается памятников письменности, то древнейшие из известных, найденные на территории Двуречья, относятся к 4-му тысячелетию до н. э. Эти области, судя по результатам раскопок, были населены еще в 6-м тысячелетии оседлыми народами с довольно высокой культурой, использовавшими металлы. В 5-м тысячелетии до н. э. с гор на эту территорию переселились шумеры, основавшие ряд поселений, которые впоследствии стали крупными городами (Ур, Эриду, Урук). Воевавшие долгое время друг с другом города к III тысячелетию до н. э. объединились в единое государство Шумер. Несколько позже усилилось соседнее государство Аккад, царь которого Саргон завоевал Шумер (примерно в 2700 г. до н. э.). После ряда междоусобных войн образовалось Шумеро-

Аккадское царство со столицей в городе Вавилоне (*“Биб-илн”* означает «Врата бога»). В правление царя Хаммурапи (2067–2025 гг. до н. э.) вавилонская культура достигла высокого уровня. Особенно выделялась техника строительства дворцов и храмов.

Как в Шумере, так и в Вавилонии основным занятием населения было земледелие, велась торговля зерном с соседними государствами. Необходимость ирригации и связанная с ней постройка плотин сплачивала общины, усиливая государство.

В первой лекции уже было сказано о том, что нужды земледельческого хозяйства должны приводить к созданию календаря и системы счета. Так в Вавилонии появились элементы астрономии и математики. Этому способствовало наличие развитой системы письма. По-видимому, письменность возникла еще в Шумере в середине 4-го тысячелетия. Сначала письмо было пиктографическим, а затем возникла клинопись.

Заметим, что еще в неолите (8 – 7-е тысячелетия до н. э.) существовали календари, выбитые на камне. Они содержали метки, соответствующие месяцам, а также указывали даты солнцестояний. На камнях также выбивались изображения созвездий. Подобные памятники «первобытной астрономии» сохранились в Закавказье и в Северной Америке.

Материалом для письма в Шумере и Вавилонии служили сырые глиняные таблички, на которые наносились нужные знаки. Затем табличка обжигалась. Археологами были обнаружены «библиотеки» с десятками тысяч табличек. Благодаря успешной расшифровке содержания таблиц историческая наука располагает обширными сведениями о культуре Вавилонии и других государств Месопотамии за тысячи лет.

Поскольку письменность играла большую роль не только в хозяйственной, но и в государственной деятельности, в Шумере и Вавилонии при храмах существовали школы писцов.

Вавилонская культура знаменовалась очень высоким развитием математики, что было обусловлено в первую очередь использованием позиционного способа записи чисел. Система счисления была шестидесятеричной, причем причина выбора этой системы пока не выяснена. Однако она оказалась настолько удобной, что греческие астрономы, а затем и арабские пользовались ею. Она применяется и в современном мире при измерении углов и времени. Применение позиционного способа записи чисел облегчало вычисления и составление таблиц, как математических, так и астрономических. Одна из таких таблиц представлена на рис. 2.

Рис. 2. Математический клинописный текст (Нововавилонское царство).

В ранние эпохи развития шумерского общества в нем господствовали анималистические верования, когда боги представлялись в образе животных. Возможно, это осталось от людей неолита, которые, как показывают

наскальные изображения, сопровождали охоту магическими обрядами. В дальнейшем в Шумере, а затем и в Вавилонии религия приобрела астральный характер — небесные светила ассоциировались с богами. Семь светил — Солнце, Луна и планеты — почитались как главные боги. Царь вавилонских богов Мардук представлялся планетой Юпитер. Заметим, что в современных европейских языках названия этих семи светил остались в наименованиях дней недели. Например, *Sonntag* (воскресенье по-немецки) — день Солнца, французский понедельник (*lundi*) — день Луны, суббота по-английски (*saturday*) — день Сатурна и т.п.

Храмы строились в форме ступенчатой конусообразной башни с площадкой наверху. Углы площадки были точно ориентированы по странам света. Существует предположение, что площадки, помимо совершения культовых обрядов, служили местом для наблюдений небесных светил.

Шумеры, как и другие земледельческие народы, применяли лунный календарь. Даже названия месяцев указывают на значение календаря в хозяйственной жизни. Например: «зерно—рука», «хлеб—срезать», «хлеб—дом». Производилась так называемая интеркаляция — добавление в году при необходимости тринадцатого месяца, поскольку двенадцать лунных месяцев составляют меньше, чем солнечный год.

Многие звезды и созвездия имели названия — например, созвездие Скорпиона называлось «Жало и клешня». Их относительное положение на небе определялось из наблюдений. По восходам светил устанавливалось начало месяца, которое находилось также по наблюдениям новой Луны в момент ее первого появления. Движение планет в древнем Вавилоне, если судить по имеющимся текстам, вначале мало интересовало жрецов. Исключением являлась Венера, особенности движения которой использовались для предсказания различных событий. Однако в дальнейшем предсказания производились и по движению других планет. Составление гороскопов было занятием специальных жрецов, которые пользовались особым почетом.

Наблюдения той эпохи служили астрологии, что соответствовало астральной мифологии и мировоззрению властителей и обитателей Древнего Вавилона. Такие наблюдения нельзя считать научными и о существовании настоящей астрономической науки в ту эпоху говорить не приходится. Накопление наблюдений еще не составляет науки, но должно предшествовать ее возникновению.

В течение II и в начале I тысячелетия до н. э. Вавилония неоднократно завоевывалась соседями — ассирийцами, касситами, хеттами и другими. Ассирийский царь Синаххериб в конце VII века до н. э. разрушил Вавилон и затопил эту территорию водами Евфрата (689 г.). Вскоре другим царем (Ассархадонем) Вавилон был восстановлен.

Завоеватели обычно не обладали столь высокой культурой, как вавилонская, и частично ее усваивали. За время, пока Вавилон был под властью иноземных завоевателей, его духовная культура не только сохранялась, но и распространялась. Судя по уровню астрономии, достигнутому в Ново-Вавилонском царстве во второй половине 1-го тысячелетия до н. э., она могла и развиваться, несмотря на разрушительные войны.

Почти одновременно с Шумером в долине Нила возникло другое государство — Древний Египет. В первоначальный период развитие культуры в нем имело ряд особенностей, обусловленных предысторией и традициями населявшего его народа, а также географическим положением. Ограниченный с одной стороны морем, а с другой — пустыней, Египет не испытывал сильного военного давления извне.

В 5-м тысячелетии до н. э. в Египте было сорок областей («номов»), обладавших культурной и во многом политической самостоятельностью. В следующем тысячелетии произошло их объединение и образовалось Древнее Царство со столицей в Мемфисе. Вблизи этого города находятся знаменитые большие пирамиды, сооруженные в качестве гробниц фараонов.

В религии Древнего Египта сначала преобладал культ животных, затем поклонялись богам, олицетворявшим небо, землю, воду, воздух. Многие мифы и обряды были связаны с земледелием, которым занималась большая часть населения. Поэтому бог Солнца (Ра) играл в верованиях древних египтян особую роль.

Письменность возникла еще в Древнем Царстве. Материалом для письма служили пластинки тростника (папируса), на которых писали чернилами. Выбивалось много иероглифических надписей на камнях. Часть иероглифов постепенно превратилась в буквы алфавита (только согласные). Благодаря сохранившимся документам и надписям на камнях историческая наука располагает обширными сведениями о культуре Древнего Египта.

Знания древних египтян о небесных светилах отставали от вавилонских. Однако в отношении важнейшей задачи — счете времени — египетские жрецы ушли вперед. Они создали солнечный календарь, в котором год состоял из 12 месяцев по 30 дней и пяти дополнительных дней. Сутки разделялись на 24 часа. По существу, этот календарь в эпоху Древнего Рима был положен в основу юлианского календаря.

Ночные часы определялись особым способом. Месяцы разбивались на декады (по 10 дней). Выбирались звезды («декань»), восходящие при рассвете и быстро гаснущие при восходе Солнца («гелиакический восход»). На каждую декаду выбиралась определенная звезда, по которой находился последний час ночи, затем на следующую декаду выбиралась другая и т. д. Этим учитывалось влияние перемещения Солнца среди звезд. В течение каждой декады конец ночи отодвигался (в сторону темноты) с тем, чтобы

потом скачком вернуться обратно к рассвету при переходе к гелиакическому восходу следующего декана. Полному обороту неба соответствует 36 деканов. Разделение ночи на 12, а не на 18 частей («часов») объясняется тем, что летом за ночь может наблюдаться только 12 деканов. Сначала «часы» этого звездного календаря были неодинаковыми, и разбиение на 24 одинаковых часа произошло позже.

Во 2-м тысячелетии до н. э. изображения созвездий выбивались на каменных саркофагах, где также изображалась схема, указывающая, какие звезды видны для каждого из 12 часов ночи. Наряду с солнечным иногда пользовались и лунным календарем — например, для определения дат новолуния, в которые устраивались празднества.

Для египтян важное значение имело начало разлива Нила, при котором земля удобрялась переносимым рекой илом. Эта дата в Древнем Египте была близка к дате гелиакического восхода Сириуса (к середине второго тысячелетия она сместилась из-за прецессии). Поэтому за положением Сириуса на небе жрецами производились особенно тщательные наблюдения.

Математика в Древнем Египте не получила сколько-нибудь значительного развития. Ее уровень был пригоден лишь для простейших практических применений, например, в строительстве. Астрономические тексты не содержат математических элементов — они являются только схемами наблюдений.

Вавилония и Древний Египет в 3 – 2-м тысячелетиях до н. э. более или менее одновременно достигли сравнительно высокого уровня материальной культуры. Распространение ее на запад — в Европу, и на восток — в Индию и Центральную Азию происходило в результате миграции населения, при завоевании новых территорий, но главным образом путем торговли с народами, населявшими в это время Средиземноморье. Этому процессу способствовало наличие развитой письменности. Важнейшую роль в расширении торговли в Средиземноморье сыграла Финикия, располагавшаяся на восточном побережье Средиземного моря (на территории нынешних Ливана и Сирии). Финикияне достигли больших успехов в мореплавании. Их корабли не только проходили Гибралтарский пролив, но совершали также плавания вдоль берегов Испании и Франции до Британии, где закупалось, в частности, добывавшееся там олово.

Значительный вклад в историю культуры был внесен финикиянами изобретением алфавита, позволявшего отражать на письме многообразие речи. Этот алфавит облегчал ведение учетных торговых записей и контакты с различными народами, а также давал возможность быстрого обучения письму. Алфавит был создан на основе египетского иероглифического письма и содержал 24 согласных буквы. В античной Греции в него были введены символы и для гласных.

Создание городской культуры в Европе после неолитической революции происходило медленнее, чем на Ближнем Востоке. При изучении истории Европы 4 – 3-го тысячелетий приходится ограничиваться только памятниками материальной культуры, обнаруженными в ходе археологических исследований, поскольку никаких письменных источников, относящихся к тому времени, не найдено.

Самым известным из древнейших сооружений в Европе является Стоунхендж (*Stonehenge*) — величественный храмовый комплекс в юго-западной Англии вблизи города Солсбери (рис. 3).

Рис. 3. Стоунхендж: современный вид. В левом нижнем углу «пяточный камень».

Строительство Стоунхенджа началось около пяти тысяч лет тому назад, еще в неолите. Население южной Англии добывало средства охотой и рыболовством, земледелие не развивалось. По-видимому, торговый путь с континента до Ирландии начинался от района Дувра — там, где пролив Ла-Манш наиболее узок, и проходил к Ирландии через сравнительно удобную для заселения и не заросшую лесом долину Солсбери. На первой стадии (2900–2100 гг. до н. э.) Стоунхендж был культовым сооружением для поклонения Солнцу и Луне. Он представлял собой кольцеобразный вал диаметром около 90 м и высотой 2 м. В северо-восточной части кольцо разрывалось. Снаружи, приблизительно в 85 м от центра кольца, был установлен монолит весом 35 т, называемый пяточным камнем (*heel stone*). Внутри вала располагалось кольцо из 56 ямок — лунок, открытых в XVII веке Дж. Обри, глубиной более метра и диаметром около 2 м.

Вторая стадия строительства началась после 2100 г. до н. э., когда население Англии уже изменилось. Господствовала культура бикеров (*beaker*), занимавшихся земледелием, строивших поселения с каменными домами и обладавших инструментами и оружием из бронзы. Вероятно, бикеры первоначально обитали на территории Центральной Европы, куда еще ранее они мигрировали из Восточной Европы. Приблизительно за сто лет была создана дорога от входа в кольцо длиной более 500 м. Внутри к кольцу примыкали четыре больших камня, названных позиционными, расположенных в углах прямоугольника. Их положение соответствует точкам, в которых наблюдается восход и заход Солнца в дни летнего и зимнего солнцестояний, а также восход и заход Луны, если наблюдения производятся из центра кольца.

На третьей фазе строительства Стоунхенджа (2000–1500 гг. до н. э.) были возведены наиболее впечатляющие сооружения — трилитная подкова и сарсеновое кольцо. Трилиты состоят из трех камней, образующих подобие ворот высотой 6–7 м. Верхний камень скреплен шипами с нижними. Трилиты образуют подкову, открывающуюся в сторону пяточного камня. Замкнутое сарсеновое кольцо диаметром 22 м состоит из вертикально по-

ставленных камней, на которые опираются плоские камни, с внутренней стороны обработанные так, чтобы вогнутости очень точно соответствовали окружности. В дальнейшем (около 1100 г. до н. э.) были сооружены дополнительные кольца и подкова. Часть этого кольца представлена на рис. 4.

Рис. 4. Стоунхендж — часть сарсенового кольца.

Исследование расположения элементов постройки показывает, что первоначально Стоунхендж был храмом, посвященным Луне. Ориентация входа в кольцо соответствовала направлению на точку восхода Луны в ее самом северном положении в течение восемнадцатилетнего цикла. Число луннок Обри дает полный цикл повторения фаз: 56 лет = (18+19+19) лет. Поэтому, ежегодно перекладывая камни (шары) в лунках, можно предсказывать фазы Луны. Изменение первоначального направления на вход на 9° во второй фазе строительства показало, что главным было выбрано направление на точку восхода Солнца в день летнего солнцестояния. По-видимому, преимущественным стало почитание Солнца.

Интересным обстоятельством оказывается уникальность прямоугольника, образуемого позиционными камнями. Он может выполнять двойную функцию — короткие стороны указывают направление на точку восхода Солнца в день весеннего равноденствия, а длинные — направления, связанные с крайними точками захода Луны. Такой прямоугольник возможен только на широте Стоунхенджа, и его существование свидетельствует о длительности рядов наблюдений Солнца и Луны, предшествовавших постройке храма.

В последние годы были исследованы различные возможности использования ориентиров Стоунхенджа для определения положения светил — при наблюдениях через трилиты и арки сарсенового кольца, высказывались далеко идущие предположения относительно прогнозирования небесных явлений по таким наблюдениям.

При наблюдениях через трилиты и сквозь арки сарсенового кольца видны точки восходов и заходов Солнца и Луны. Если в момент зимнего солнцестояния полная Луна восходит над пяточным камнем, то это означает, что она находится в узле орбиты и должна, двигаясь вокруг Земли, войти в ее тень, т. е. произойдет полное лунное затмение. Если предполагать, что использовавшим для наблюдений Стоунхендж жрецам было известно соотношение между продолжительностями тропического (T) и драконического (E) годов

$$56T = 59E,$$

то при передвижении камней по лункам Обри, отражающем перемещение узлов лунной орбиты, можно было предсказывать затмения. Некоторыми из современных исследователей предлагались различные алгоритмы такого

передвижения. Однако маловероятно, чтобы в Англии 2-го тысячелетия до н. э. существовала возможность для разработки и реализации столь сложных процедур.

Строительство Стоунхенджа и других подобных, но меньшего масштаба сооружений могло осуществиться лишь в достаточно развитом обществе с сильной властью. В противном случае было бы невозможно осуществить работу по возведению этих грандиозных по своему плану и технологии объектов. Отсутствие даже следов письменности и других свидетельств высокой духовной культуры, а также трудности проведения долговременных наблюдений в условиях климата Англии делают правдоподобным предположение о влиянии других культур на строительство Стоунхенджа, по крайней мере на второй и третьей его фазах. Связи культур подтверждаются археологическими находками в погребениях вблизи Стоунхенджа изделий из янтаря, золота, фаянса средиземноморского происхождения. Показательно сходство трилитов, не только по форме, но и по технике постройки, с сооружениями в Микенах, относящимися к середине 2-го тысячелетия до н. э.

Вполне возможно, что в проектировании и строительстве Стоунхенджа участвовали люди, знакомые с культурой Вавилонии и обладавшие астрономическими познаниями. Мегалитические сооружения и «лабиринты» вдоль побережья Атлантического океана, центр металлургии, существовавший на Дунае в 6–5-м тысячелетиях до н. э., и другие археологические памятники свидетельствуют об интенсивном обмене культурными достижениями территорий Западной Европы со странами Средиземноморья.

Связи Шумера и Вавилонии со странами, расположенными восточнее, в частности на полуострове Индостан, были, по-видимому, установлены не позднее 4-го тысячелетия до н. э. Об этом свидетельствуют находки при раскопках шумерских поселений печатей, относящихся к древней культуре Мохенджо-Даро (3250–2750 гг. до н. э.). В Мохенджо-Даро (город в долине реки Инд) при археологических исследованиях было обнаружено множество памятников развитой материальной культуры. Спланированные кварталы города состояли из двухэтажных домов, в них были колодцы и система канализации. Широко использовались различные металлические изделия, были весы с каменными гирями, счет велся в десятичной системе. Существовала письменность на стадии перехода от пиктографического письма к иероглифическому. Занятием жителей Мохенджо-Даро было земледелие, но календарей, которыми они пользовались, пока обнаружить не удалось.

В конце 3-го тысячелетия на эту территорию вторглись арии — скотоводческие племена более низкой культуры, еще сохранившие племенно-родовой строй. В конце 2-го тысячелетия произошел переход к земледелию. Письменность — на основе уже существовавшей на этой территории — дала начало санскриту. В IX веке до н. э. появилось и алфавит-

ное письмо, содержащее 51 букву. С развитием земледелия возник календарь — солнечный год содержал 360 дней по 12 месяцев, через каждые пять лет добавлялся тринадцатый месяц. Ряд созвездий получил названия, но понятия Зодиака не было. Выделялось пять планет. В IV – III веках до н. э. от греческих и вавилонских источников были восприняты основные математические понятия и астрономические представления.

Об истории культуры одного из древнейших государств Азии — Китая, в котором иероглифическая письменность была еще в 3-м тысячелетии, осталось мало документальных свидетельств, так как сохранились лишь книги, относящиеся к первому тысячелетию до н. э. На территории Китая найдено много стоянок неолитического периода, но о переходе к веку бронзы, к оседлости и земледелию рассказывают только легенды. Централизованное государство сформировалось лишь к XVIII веку до н. э. Господствовавшей религией стала анималистическая, широко распространился культ предков. Главный предок царя и всех людей — Небо.

В конце 2-го тысячелетия начались систематические наблюдения за движением светил и небесными явлениями со специальных площадок («обсерваторий»). Результаты наблюдений записывались. Сначала использовался лунный календарь, затем солнечный. Центром (вершиной) Вселенной считался Полнос Мира, к которому император «был приближен». Небо разбивалось на 28 участков — созвездий. Из них 12 созвездий составляли аналог Зодиака. По положению Солнца в разных созвездиях определялась смена сезонов. Более точные наблюдения небесных светил начались лишь с середины первого тысячелетия до н. э.

Как показывает сделанный обзор развития культуры при переходе от неолитического образа жизни к государственным формациям, оно происходило более или менее одинаково на различных территориях. К завершению переходного периода был достигнут определенный уровень знаний о расположении светил по небесной сфере и особенностях их движения. Установление периодичности движения Солнца и Луны позволило создать календарь и измерять большие промежутки времени по наблюдениям положений этих светил. Однако такие знания еще не составляют астрономии как науки. Мифологические представления о небе и небесных светилах, относящиеся к божествам, не должны считаться естественной наукой и их следует относить к предыстории астрономии.

Лекция III

Зачатки астрономии в 1-м тысячелетии до н. э. — Нововавилонское царство, Древняя Греция

Хотя после завоевания касситами, а затем ассирийцами Древняя Вавилония пришла в упадок, это сравнительно мало сказалось на религиозных отношениях и на деятельности жрецов. Завоеватели поклонялись тем же богам, из которых главным был Мардук, и традиционные наблюдения небесных светил, по представлениям того времени олицетворявших богов, продолжались. Ассирийские правители были заинтересованы в предсказаниях астрологов, что также стимулировало наблюдение небесных явлений.

В конце VIII века до н. э. ассирийское государство стало распадаться под влиянием различных политических и экономических факторов. Военственные племена, пришедшие из Аравии («халдеи» по-гречески), завоевали Вавилон и во главе Нововавилонского царства стал Набопалассар, разгромивший столицу Ассирии Ниневию (в XIX – XX вв. при раскопках Ниневии нашли богатейшее собрание табличек с надписями различного содержания, в том числе и астрономического). При правлении его сына Навуходоносора (VI в. до н. э.) Вавилония процветала, главным образом благодаря торговле с другими странами. Возникли большие частные землевладельческие хозяйства, интенсивно сооружались пышные храмы и дворцы («сто городских ворот, сделанных целиком из меди», «висячие сады Семирамиды», храм Мардука и др.). В самом Вавилоне насчитывалось до 600 000 жителей. Достижения более высокой, чем в других странах, культуры (нововавилонской) — как материальной, так и духовной — распространялись по странам Средиземноморья, Северной Африки и Азии. Существовали тесные связи и с Индией. Вместе с тем там знакомились и с астрономи-

ческими познаниями, приобретенными в Месопотамии за предшествующее тысячелетие.

Соперничавший долгое время с Вавилонским царством Египет после его завоевания гиксосами, а затем и ассирийцами превратился в слабое государство, где выдающихся достижений в духовной культуре не было.

В первой половине 1-го тысячелетия до н. э. племена, пришедшие ранее на Иранское плоскогорье, вторглись в Месопотамию. Судя по их языку они были родственны племенам, вторгшимся в то же время в Индию. Образовавшаяся «страна арьев» — Иран (Персия) — при царях Кире, Камбизе и Дарии I стала мощным и хорошо организованным государством, покрывшим многие из окрестных стран. В 538 г. до н. э. Киром был завоеван Вавилон. Основными занятиями населения Персии были земледелие и скотоводство. В религии оставались элементы анималистического культа. Поклонялись также богам, олицетворявшим природу — земли, неба, воды и огня. Особым влиянием пользовался культ бога Солнца — Митры. Под влиянием вавилонской культуры в Персии возникло алфавитное клинописное письмо, которое применялось и для выбивания на камнях надписей, прославлявших деяния царей.

Наблюдениям вавилонскими жрецами небесных светил персидские завоеватели не препятствовали, так как они вообще не затрагивали религиозные верования покоренных народов. Но поскольку в астрологических предсказаниях жрецов завоеватели не нуждались, наблюдения проводились с целью уточнения имевшихся данных о небесных явлениях и движениях светил. Появлялись даже карты звездного неба, где изображались «пути богов».

В середине 1-го тысячелетия до н. э. возникла необходимость усовершенствования методов, которыми определялась периодичность небесных явлений. Отклонения видимого движения Луны от строго периодического и обусловленность чередования фаз Луны движением Солнца, происходящим с другим периодом, вызывали большие трудности в хронологии, использовавшей лунный календарь. В лунном календаре за начало месяца принимался момент, когда становится видным новый серп Луны после захода Солнца. Месяц должен содержать целое число дней — 29 или 30. Сначала это условие осуществлялось вставкой дополнительного месяца — интеркаляцией. В VI – V веках до н. э. цикл интеркаляции был восьмилетним, но с IV века (380 г. до н. э.) использовался девятнадцатилетний цикл интервалов между годами, когда производилась интеркаляция: (3, 3, 2, 3, 3, 3, 2). Он вытекает из соотношения

$$235 \text{ средних лунных месяцев} = 19 \text{ средним солнечным годам.}$$

Знание этого соотношения показывает, что в то время уже была известна продолжительность среднего солнечного года. Вавилонские жрецы знали

также Зодиак, который они разделяли на 12 участков, каждый из них делился на 30 равных частей — градусов. Таким образом, они пользовались системой эклиптических координат.

Нахождение количественных соотношений между периодами различных явлений в VIII – VII веках явилось началом научной астрономии в Вавилонии. Составлялись таблицы положений Солнца, Луны и планет, определяемых из наблюдений. При этом использовались шестидесятеричная позиционная система счисления и дроби со знаменателями, равными степени 60. В XIX веке при раскопках в городах Вавилонии были найдены астрономические таблицы, содержащие эфемериды Луны и планет очень высокой точности. История их создания остается невыясненной, но можно утверждать, что они были составлены не ранее ~ 300 г. до н. э. (в эпоху Селевкидов, уже после завоевания Персии Александром Македонским). Их принято называть «халдейскими таблицами». Никаких пояснений к таблицам не найдено. По-видимому, для составления этих таблиц применялся математический метод «зигзагообразных линий», заключающийся в представлении гладкой кривой, описывающей временные изменения, линией, составленной из отрезков прямых.

Как уже было сказано, главной задачей астрономии в то время было определение периодичности появления лунного серпа в момент захода Солнца. Для ее решения следует учитывать следующие обстоятельства:

1. Расстояние Луны от Солнца.
2. Наклон небесного экватора к горизонту.
3. Изменение угла между эклиптической и горизонтом.
4. Смещение Луны по широте.

Таким образом для того, чтобы предсказать перемещение Луны, необходимо принимать во внимание несколько явлений различной периодичности.

Данные наблюдений времени восхода и захода светил, противостояний и соединений Луны и планет, затмений и других явлений записывались жрецами еще с VIII в. до н. э. — такие таблицы были найдены. Определялись и приводились в таблицах также интервалы времени между этими событиями, например между заходом Солнца и восходом Луны.

Повторение явления на другой долготе (или широте) определяет «скорость» смещения по соответствующей координате за период. Поскольку наблюдатели не имели понятия о небесной сфере, движения считались происходящими на плоскости.

Было замечено, что «скорость» одного и того же явления — например, промежутков времени между соседними полнолуниями (противостоя-

ниями), зависит от того, по какую сторону эклиптики оно происходит. Изменение скорости представлялось «линейной зигзагообразной функцией» (рис. 5). Это означает, что по одну сторону эклиптики смещения возрастают со временем в арифметической прогрессии (линейно) от некоторого наименьшего значения m до наибольшего M , а по другую сторону эклиптики — убывают от M до m . Расстояние между двумя соседними макси-

Рис. 5. Зигзагообразная линия.

мумами, измеренное в выбранной единице времени (например, в синодических периодах) определяет период этой функции P . Амплитуда изменений $\Delta = M - m$, а среднее значение $\mu = \frac{1}{2}(M + m)$. Учитывая, что функция симметрична, имеем равенство

$$P = \frac{2\Delta}{d}.$$

При наличии достаточно продолжительных рядов наблюдений вводятся поправки в значения Δ и d и при этом получается уточненное значение периода P .

С применением указанного метода в одной из таблиц, найденных при раскопках, относящейся к 134–133 гг. до н. э., приводится сравнительно точное соотношение между длиной года и синодическим периодом Луны, полученное по наблюдениям ежемесячных значений долгот Солнца и Луны:

$$225 \text{ лет} = 2783 \text{ синодических месяца.}$$

В более сложных случаях, когда наблюдаемая периодичность явления зависит от периодов более чем двух движений, при составлении эфемерид метод зигзагообразных функций применялся последовательно к каждому движению, исключая остальные. В итоге получилась «обобщенная» зигзагообразная функция, т. е. ломаная, составленная из нескольких отрезков прямой (рис. 6). Таким способом находилась периодичность лунных затме-

Рис. 6. Сложная зигзагообразная линия.

ний. Соответствующая таблица содержит колонки чисел:

1. Год и месяц.
2. Длина каждого месяца, находимая с помощью зигзагообразной функции в предположении постоянства скорости перемещения Солнца.
3. Скорость движения Солнца.
4. Долгота Луны в полнолунии — именно в этой фазе может произойти лунное затмение.

5. Продолжительность дня и ночи, соответствующая долготе Солнца.
6. Колебания широты Луны, найденные по зигзагообразной функции.
7. Максимальная фаза затмения (мера погружения Луны в тень) в зависимости от широты Луны.
8. Изменения скорости смещения Луны.
9. Продолжительность синодического месяца при постоянной скорости Солнца, но меняющейся скорости Луны.
10. Поправка к продолжительности синодического месяца, обусловленная колебаниями скорости Солнца.

Сумма величин, найденных по пунктам 9 и 10, дает поправку за счет движения и Луны, и Солнца, которая позволяет найти момент соединения, если известен момент предыдущего соединения. Аналогичные таблицы составлены для моментов противостояний. Посредством таких таблиц устанавливали периодичность лунных затмений — цикл, называемый «сарос». Что касается солнечных затмений, то на основе информации, содержащейся в подобных таблицах, можно говорить только о возможности видеть затмение в данной местности. По рис. 7 видно, что предсказания свойств лунного затмения по халдейским таблицам неплохо согласуются с определенными современными методами.

Рис. 7. Размеры лунных затмений: сплошная линия — древние данные, пунктирная линия — рассчитанные современные данные. Ордината, равная 12, соответствует полному погружению Луны в тень.

В сохранившихся халдейских таблицах содержатся эфемериды и для планет. Одни из таких таблиц изображены на рис. 8. Они определялись при более простых предположениях — постоянстве скорости Солнца, а также допущении, что и планета смещается с постоянной скоростью. Наблюдателей в древности интересовали лишь моменты первой (при восходе) и последней (при заходе) видимости. Для Меркурия были получены соотношения:

2673 раза восходит как утренняя звезда за 848 лет,
1513 раз восходит как вечерняя звезда за 480 лет.

Явление одного типа повторяется — за это время планетой проходит на небе «синодическая дуга». Ее величина зависит от положения Солнца на эклиптике. Методом зигзагообразных функций было найдено, например, для Юпитера, что 391 синодический период равен 36 обращениям. Погрешность приближения при использовании этого метода оказывается равной

примерно $20'$, что было достаточно хорошо для наблюдателей в древности. Поскольку период обращения планет гораздо больше, чем у Луны, для сопоставления повторяемости какого-либо явления, относящегося к данной планете, с периодом обращения Солнца необходимы данные наблюдений за большой промежуток времени — до сотни лет.

Рис. 8. Глиняная табличка с записью эфемериды Сатурна (1-е тысячелетие до н. э.).

Установление периодичности явлений, происходящих на небе, и количественных зависимостей между периодами было выполнено в отсутствие геометрических и тем более физических представлений об этих явлениях. Разрабатывались лишь процедуры нахождения периодов из наблюдений координат светил. Однако несмотря на ограниченность задач, решавшихся вавилонскими наблюдателями, результаты их деятельности оказались существенными для развития астрономической науки в последующие эпохи, в частности, в античной Греции.

После «взлета» жреческой науки в конце 1-го тысячелетия до н. э. она пришла в упадок. Астрономических текстов, относящихся ко времени после 70 г. н. э., не обнаружено.

Из множества культур, формировавшихся в 3 – 2-м тысячелетиях до н. э. в Средиземноморье, во втором тысячелетии видное место заняла эгейская (или крито-микенская) цивилизация. Она охватывала территории Крита, Пелопонесского полуострова, западного побережья Малой Азии и ряд островов Эгейского моря. Их заселение произошло предположительно с севера или с северо-запада, в третьем тысячелетии. В XVIII веке до н. э. они уже обладали линейным письмом. Судя по языку надписей на сохранившихся глиняных табличках пришедшие племена относились к индоевропейцам. Бронза и золото использовались ими еще в конце третьего тысячелетия, но об употреблении железа неизвестно.

Расцвет крито-микенской культуры произошел в середине 2-го тысячелетия до н. э. Совершенствовалась техника строительства жилых и общественных сооружений, получило распространение изобразительное искусство, превосходившее то, что было в Месопотамии и Египте. Крит имел через финикийян тесные торговые связи с рядом средиземноморских государств.

Мощное государство, центром которого был Крит, распалось под ударами вторгавшихся с севера дорийских племен, а также вследствие разрушений, вызванных сильным землетрясением. На Балканском полуострове в это время развивалась так называемая эллидская культура и в XVI – XII веках до н. э. существовало государство с центром в Микенах. Оно также было завоевано дорийцами.

Наряду с дорийцами по островам и побережью Эгейского моря расселялись и другие греческие племена, находившиеся на стадии перехода

от родового строя к рабовладельческому обществу. Много сведений об их образе жизни дают поэмы Гомера, описывающие события Троянской войны (XII в. до н. э.). В частности, в «Одиссее» рассказано об использовании созвездий — Плеяд, Большой Медведицы и других, а также Венеры и Сириуса в навигационных целях, что свидетельствовало о хорошем знании неба. Вместе с тем из-за раздробленности населения не существовало единого календаря — периодизация сельскохозяйственной деятельности производилась по положению созвездий. Для измерения времени суток использовался гномон. Поскольку в IX — VIII веках до н. э. государства — полисы — формировались на отдельных островах, то отсутствовала общая система летосчисления — оно долго оставалось локальным и велось «по царям» и выдающимся событиям. Общегосударственный счет лет, начавшийся с даты первых Олимпийских игр (776 г. до н. э.), был введен лишь в VII веке до н. э. Начало года отсчитывалось от летнего солнцестояния.

Необходимость жизнеобеспечения государств-полисов вызывала развитие мореплавания, в отношении которого греки успешно конкурировали с финикийцами. С финикийской письменностью связано возникновение классического греческого алфавита, самые ранние из известных образцов которого относятся к VIII веку до н. э. В качестве материала для письма употреблялась специально выделанная кожа (пергамен) и дерево, а надписи высекались также на камнях.

Особенности формирования культуры Древней Греции обусловлены географическим фактором. Объединения разбросанного по многим островам населения в единое государство — империю — не произошло, и стремления к завоеваниям других стран не было. Население отдельных полисов еще не отошло от общинного быта и, будучи сравнительно малочисленным, продолжало жить в условиях демократии — даже при возникающем имущественном разделении. Силы общества не затрачивались ни на строительство грандиозных сооружений, ни на создание большой армии. Так было, по крайней мере, до VII — VI веков до н. э.

Разобщенность полисов породила и специфические черты религиозных представлений. Единого понятия о боге не было. Древние греки в качестве богов почитали героев своей истории, исходя из мифологических представлений. Эти боги наделялись человеческими чертами и даже присущими людям недостатками. В отсутствие единого бога — вездесущего, всесильного и полностью определяющего судьбу человека, жречество не могло занять сколько-нибудь выдающегося положения и тесно сомкнуться с властью. Особенности религии в Древней Греции сыграли положительную роль в развитии духовной культуры, освобождая людей от слепого повиновения жрецам, развивая личную инициативу и допуская свободный обмен мнениями. Поэтому и начатки научных знаний создавались не жрецами, а любознательными людьми — философами («любителями мудрости»). Хотя и в

других древних обществах (например, в Китае, Индии) также были люди, называвшиеся философами, их учения имели главным образом этический характер, а все, что касалось устройства мира, связывалось с волей богов. Древняя Греция стала родиной философских школ, в которых философы развивали свои представления о мире вне зависимости от религиозных догм путем обсуждения — дискуссии.

В Древней Греции было написано множество сочинений на разные темы, и уже в V веке до н. э. существовали большие библиотеки. Сотни тысяч рукописей, хранившихся в них, не дошли до нашего времени, и историками античности используются более поздние копии, а также ссылки на древние рукописи арабских и средневековых авторов. Все же на основе этих материалов получено сравнительно полное представление об античной науке.

Взгляды античных философов VI – V веков до н. э. на устройство мира были весьма примитивными. Так, о Фалесе (625–547 гг. до н. э.), одном из «семи мудрецов», как называли первых философов, в имеющихся источниках говорится, что он наблюдал звезды и будто бы предсказывал солнцестояния и затмения. Вместе с тем, он полагал, что плоская Земля плавает на воде. Позднее у философа Анаксагора из Клазомен (500–428 гг. до н. э.), друга знаменитого государственного деятеля Перикла, были уже более четкие представления о небесных явлениях. По его утверждениям, Земля подобна цилиндру, парящему в пространстве, а вокруг Земли движутся другие небесные тела. Луна светит отраженным от Солнца светом, само же Солнце не меньше Земли и представляет собой чистейший огонь. Анаксагор объяснял затмения Луны попаданием ее в тень Земли.

Вавилонская астрономия оказала значительное влияние на формирование знаний о небе в Древней Греции. Были выделены зодиакальные созвездия, принят подобный вавилонскому лунный календарь, согласовывавшийся с годичным солнечным движением путем интеркаляции. В 433 г. до н. э. афинский астроном Метон предложил 19-летний цикл, хотя нельзя утверждать, что он его обнаружил самостоятельно, а не принял от вавилонских астрономов. С вавилонскими были сходны и названия планет. В сочинении Птолемея «Альмагест», которое более подробно рассмотрено далее, отмечается, что Гиппарх в своих теориях использовал величины периодов движений небесных тел, известные вавилонским астрономам.

В Древней Греции применялись арифметические методы составления гороскопов, разработанные в Вавилонии. В математических и астрономических рукописях того времени употребляется сложная цифровая система. Цифры 1, 2, . . . , 10 обозначались буквами алфавита, затем шли специальные знаки, включая знак для нуля. Система счисления была шестидесятеричной.

В VI веке до н. э. философские школы развивались уже не только на территории Греции, но и в ее колониях. В частности, на юге Аппенин-

ского полуострова возникла школа последователей философа Пифагора (570–500 гг. до н. э.), связывавшего сущность мира с соотношениями между числами. Как сообщали древние авторы, Пифагор считал, что Земля шарообразна.

Философские взгляды Гераклита Эфесского (535–475 гг. до н. э.) получили широкую известность. Он утверждал, что все сущее в мире постоянно изменяется, но не по воле богов, а по своим законам. Часто цитируемое высказывание Гераклита «все течет, все изменяется» приводится в истории философии как пример диалектического подхода к действительности. Что же касается представлений Гераклита о небе и наблюдаемых там явлениях, то они были очень далеки от реальности. Он считал, что мир состоит из огня и его превращений. Поскольку такой взгляд не основан на каких-либо наблюдаемых фактах и является поэтому чисто умозрительным, обсуждение учения Гераклита представляет интерес только для истории философии, но не для истории естественных наук.

Столь же оторванными от наблюдений над природой были представления Демокрита (460–370 гг. до н. э.), «ученика магов и халдеев». Он ввел понятие о порождающих все в мире неизменных частицах, названных им атомами. Тела образуются из сгущений атомов, создаваемых «вихрями». Некоторыми авторами в этих воззрениях усматривается аналогия с современными физическими и космогоническими теориями.

Философ Платон (427–347 гг. до н. э.), основавший в Афинах школу, вообще исключал наблюдения как способ познания природы и в особенности звездного неба. «Мы должны изучать астрономию точно так же, как математику, при помощи теорем, а звездное небо исключается, если мы хотим получить истинное знание астрономии» (Платон, «Республика»). В другом своем сочинении («Тимей») Платон пишет, что светила являются «божественными сущностями с телом и душой; их видимая форма состоит в основном из огня для того, чтобы они выглядели самыми яркими и прекрасными; и для сходства со Всецелым они делались шарообразными».

Таким образом можно констатировать, что несмотря на наличие в Древней Греции демократии и свободомыслия, способствовавших духовной культуре, развитию литературы, философии и искусства, знания о природе оставались на очень низком уровне. Предлагавшиеся «модели мира» не подвергались проверке наблюдениями. Причина, возможно, заключалась в структуре общества и разделении труда, при которых «творцы» духовных ценностей отстранились от практической деятельности. Вместе с тем древнегреческие математики ушли вперед по сравнению с вавилонскими астрономами в создании моделей движения небесных тел.

Геометр Евдокс Книдский (408–355 гг. до н. э.), считающийся одним из самых выдающихся математиков Древней Греции, много времени провел в Египте, а затем жил в Афинах. Он уделял много внимания астрономии

и занимался, в частности, наблюдениями движений планет. Ему принадлежит первая кинематическая модель движения небесных светил.

Согласно этой модели, каждое из светил скреплено с равномерно вращающейся сферой. В общем для всех этих сфер центре расположена Земля. Небесная сфера вращается вокруг горизонтальной оси, ориентированной в направлении север–юг, и совершает полный оборот за сутки. Планета вместе со своей сферой, ось которой наклонена по отношению к горизонтальной оси, вращается в противоположном направлении — с запада на восток, и описывает за полный оборот петлю на фоне первой сферы (звездной). Таким образом объяснялась главная особенность видимого движения планет. Чтобы получить наблюдаемые петли, для каждой из планет следует добавить к ним еще по две сферы, также равномерно вращающиеся, причем ось одной скреплена с полюсом другой. Тогда получается сочетание вращения и колебаний. Как было показано расчетами, выполненными в XIX веке (!), при надлежащем подборе углов между осями вращения четырех сфер для дуг попятного движения Юпитера и Сатурна можно получить величины, соответствующие наблюдаемым. Для объяснения движений Солнца и Луны достаточно трех сфер.

В сохранившейся рукописи (V в. н. э.) комментаторов греческой философии говорится, что математик Каллипп (IV в. до н. э.) увеличил число сфер до 33 и тем самым добился согласия с наблюдениями для Марса и Венеры, которого не было в исходной модели Евдокса. Каллиппу же приписывается нахождение точного значения для продолжительности года (365 1/4 суток) и уточнение различной продолжительности времен года, т. е. неравномерности движения Солнца по эклиптике.

В трудах одного из крупнейших мыслителей древности Аристотеля (384–322 гг. до н. э.) мир рассматривается состоящим из двух частей: неизменного (божественного) небесного мира, не меняющегося со временем, и подлунного (земного) мира, где все меняется, подвержено случайности, все процессы имеют начало и конец. Аристотель пытался найти причины этих изменений. Соответственно явления выводились из общих относящихся к ним понятий («сущности»), а связь между явлениями и понятиями устанавливалась логически.

Предполагая полную симметрию мира, Аристотель считал, что он состоит из геоцентрических сфер. Движения могут происходить вокруг центра или вдоль радиусов — вверх или вниз. Подлунная часть мира содержит четыре элемента («стихии») — землю, воду, воздух и огонь, расположенные друг над другом по концентрическим сферам. Земля находится в центре мира. О сферичности Земли свидетельствуют наблюдения формы тени во время лунных затмений. Луна также шарообразна. По мысли Аристотеля, геоцентрические сферы, введенные Евдоксом и Каллиппом, прозрачны, так

как состоят из хрусталя. Всего сфер 55, и источником движения (суточного вращения) является вращение внешней сферы.

Модель мира по Аристотелю отражала уровень знаний той эпохи. При всей своей удаленности от реальности она в течение полутора тысяч лет оставалась единственной, принимавшейся астрономами и христианской религией.

Аристотелем закончился тот период развития античной философии, который называют эллинским. В IV веке до н. э. после войн со Спартой афинское государство пришло в упадок и вошло в империю, созданную Александром Македонским (356–323 гг. до н. э.), одним из учителей которого был Аристотель. С этого времени центром культуры и науки стала столица империи Александрия — основанный в дельте Нила город, представлявший очень удобным для морских связей с различными областями Средиземноморья.

Лекция IV

Астрономия в эллинистический период (323 г. до н. э. — 300 г. н. э.)

В результате завоевательных войн, которые вел Александр Македонский, возникла огромная империя и наступила новая эпоха в развитии античной культуры. В первую очередь это сказалось в распространении влияния греческой культуры на страны Востока — до границ Индии — и Средиземноморья, включая Египет. В империю вошли многие до той поры самостоятельные государства-полисы на островах Эгейского моря. Вскоре после смерти Александра Македонского империя распалась на ряд государств, самыми значительными из которых были Македония, Египет, Пергам (в Малой Азии), а также некоторые из больших островов — Родос, Лесбос, Делос и другие. Эти государства связывали общий язык и возникающая культура, а также интенсивная торговля.

В процессе культурного обмена происходило и взаимное обогащение знаниями — так, в частности, греческим ученым стали доступны знания о небе и небесных явлениях, имевшиеся у вавилонских жрецов.

Основанный Александром Македонским город Александрия в дельте Нила стал благодаря своему выгодному географическому положению средоточием торговых связей, будучи при этом столицей Египта. Александрия во II – I веках до н. э. была огромным городом, насчитывавшим сотни тысяч человек свободного населения и гораздо большее количество рабов. Цари Египта из династии, основанной полководцем Александра Македонского Птолемеем, использовали наплыв богатств в столицу не только для строительства дворцов и храмов, но также покровительствовали искусствам, устраивая блестящие празднества и театральные представления. Сделав Александрию «культурной столицей» Средиземноморья, они для упрочения своей славы привлекали в нее архитекторов, художников и ученых из

различных областей эллинского мира. Среди ученых, приехавших в Александрию, было много ранее живших в Афинах, где существовали давние философские традиции. Там Аристотелем был создан Лицеум, объединявший ученых, а еще до этого находилась Академия, организованная Платоном. По их подобию в Александрии образовалось особое учреждение — содружество ученых (прообраз Академии Наук), называвшееся «Музей» (от слова «музы»). Заведующий Музеем именовался «жрецом муз».

Ученые жили при Музее и обеспечивались всем необходимым для своих занятий. В Музей входили обсерватория, ботанический сад, лаборатории — залы для опытов. Подобная форма организации науки была чужда восточной культуре. Она просуществовала более 500 лет и внесла неоценимый вклад в последующее развитие культуры в европейских странах.

В Александрии располагались огромные библиотеки. В самой большой из них — «царской» — в конце I века до н. э. хранилось более 700 000 манускриптов. Большую библиотеку имел город Пергам, отличавшийся своим богатством, храмами и выдающимися произведениями искусства. Там производился материал для письма — тонкая выделанная телячья кожа, получившая название пергамен.

В культурных центрах эллинистической эпохи большое значение придавалось образованию. Существовало множество школ разного уровня обучения.

Материальная и духовная жизнь в Александрии и других центрах эллинистического мира достигла наивысшего расцвета в последнем столетии до н. э., но затем противоречия между различными государствами региона привели к их упадку и ослаблению общественной жизни. В это же время происходило усиление Древнего Рима, в военном и государственном отношениях отличавшегося более совершенной организацией. Во II веке до н. э. Македония, а затем и другие области Греции были завоеваны римлянами. Однако главные культурные центры, в частности Александрия, сохраняли свое значение, хотя художники и ученые из различных областей Греции стремились перебраться в Рим, являвшийся центром империи.

Переходя к подробному изложению развития астрономии в эллинистическую эпоху, следует еще раз напомнить о том, что результаты трудов вавилонских жрецов должны были стать известны греческим астрономам. В государстве Селевкидов, образовавшемся на территории Персии, завоеванной Александром Македонским, сохранялась вавилонская культура и продолжались наблюдения за небесными светилами. По сообщениям древних авторов, вавилонский жрец Борог (~275 г. до н. э.), написавший историю Вавилонии, переехав в Грецию, возможно, сообщил греческим ученым о многих полученных в Вавилоне астрономических результатах.

Достигнутые греческими астрономами успехи в создании теорий движения небесных тел, позволяющих предсказывать различные явления, в

большой мере были обусловлены развитием в эллинистическую эпоху математики. Особо важными были труды Евклида (~300 г. до н. э.), Аполлония Пергамского (~230 г. до н. э.) и Архимеда (~216 г. до н. э.), выработавших и использовавших метод решения геометрических задач на строго логических основаниях. Знаменитое сочинение Евклида «Начала» содержит настолько полное изложение этого метода, что на протяжении двух тысячелетий оно не нуждалось в дополнениях и изменениях. Этот метод использовался при решении астрономических задач вплоть до XVII века — Птолемеем, арабскими астрономами, Коперником и Ньютоном.

Система мира, созданная Аристотелем, и в эллинистическую эпоху принималась большинством философов как единственно правильная, хотя высказывались и иные взгляды по поводу характера наблюдаемых на небе движений. Так, в частности, современник Аристотеля Гераклид Понтийский (388–315 гг. до н. э.) и некоторые другие философы считали суточное вращение небесного свода лишь видимым следствием вращения Земли. Ссылки на не дошедшие до нашего времени труды Гераклида дают основание считать, что он объяснял особенности движения Меркурия и Венеры вращением этих планет не вокруг Земли, а вокруг Солнца, которое само вращается вокруг Земли.

Совершенно иное место в системе мира отводилось Солнцу Аристархом Самосским (310–230 гг. до н. э.), который, также впервые в истории астрономической науки поставив задачу об определении расстояний до Солнца и Луны, предложил метод ее решения и сам пытался найти расстояния из наблюдений. Этим вопросам посвящено единственное дошедшее до нас сочинение Аристарха «О размерах и расстояниях Солнца и Луны». Он основывался на известных к тому времени представлениях о том, что Луна вращается вокруг Земли и получает свой свет от Солнца. Затмение Луны происходит при погружении ее в тень Земли. При видимости половины Луны ее угловое расстояние от Солнца «меньше прямого угла на $1/30$ его часть». На этой основе путем применений геометрических теорем Аристархом были получены для величины неравенства для оценки отношения расстояния до Солнца r_{\odot} к расстоянию до Луны $r_{\text{Л}}$: $18 < \frac{r_{\odot}}{r_{\text{Л}}} < 20$. Аристарх, как и другие математики того времени, не использовал числа 19, но, поскольку $\sin 3^{\circ} \approx \frac{1}{19}$, то $\frac{r_{\odot}}{r_{\text{Л}}} = 19$. Это значение и применяется далее при записи соотношений между расстояниями и диаметрами, выведенных Аристархом.

Рис. 9. Треугольник Аристарха: A — положение Солнца в квадратуре, B — положение Земли, C — положение Луны. $\angle BAC = \angle EBD = 3^{\circ}$.

Отношение расстояний получено путем довольно сложного логического рассуждения (приведенного в книге А. Паннекука на стр. 572) на основе так называемого треугольника Аристарха (рис. 9). При определении отно-

шения размеров Солнца и Луны по отношению к размерам Земли Аристархом было принято, что ширина земной тени равна «ширине двух Лун», а диаметр Луны равен «1/15 знака Зодиака» (это соответствует 2° , что вчетверо больше наблюдаемой величины). Отношение диаметра Солнца D_\odot к диаметру Луны D_\ominus :

$$\frac{D_\odot}{D_\ominus} = \frac{r_\odot}{r_\ominus},$$

и поскольку ширина сечения конуса тени равна $2D_\ominus$, то

$$D_\ominus = \frac{1}{19}D_\odot.$$

Расстояние от вершины конуса тени до полной Луны во время затмения равно $2/19$ расстояния от вершины до Солнца, поэтому полная Луна удалена от Солнца на $17/19$. Землю от вершины тени отделяет расстояние $\frac{17}{19} \cdot \frac{1}{20} + \frac{2}{19} = \frac{3}{20}$, равное отношению диаметров Земли и Солнца. У Аристарха это записано следующим образом:

$$\frac{19}{3} < \frac{D_\oplus}{D_\odot} < \frac{43}{5}.$$

Отношение диаметров Луны и Земли равно $20/57$. В результате были найдены следующие соотношения:

$$D_\odot \approx 7D_\oplus, \quad D_\ominus \approx \frac{7}{19}D_\oplus, \quad r_\odot \approx \frac{361}{2}D_\oplus, \quad r_\ominus \approx \frac{19}{2}D_\oplus.$$

Для отыскания численных соотношений Аристарх доказывал геометрические теоремы, а исходные положения (условия теорем) называл гипотезами. Хотя полученные значения диаметров и расстояний далеки от действительности, все же из них вытекает очень важный для понимания системы мира вывод. Аристарх нашел, что объем Солнца заключен между 254 и 368 объемами Земли, т. е. Солнце представляет собой очень большое по сравнению с Землей тело. Поэтому нет ничего удивительного в том, что Аристарх считал Землю вращающейся вокруг Солнца. Об этом написал Архимед в своем сочинении «Псаммит» («Исчисление песчинок»): «Он [Аристарх Самосский] предположил, что звезды и Солнце неподвижны, что Земля обращается вокруг Солнца по окружности с Солнцем в центре». Далее Архимед указывает на очень большую величину радиуса сферы неподвижных звезд по сравнению с расстоянием от Земли до Солнца.

Таким образом, Аристарх внес важнейший вклад в науку, впервые оценив расстояния до небесных светил. Расстояние до Солнца, полученное им, долгое время — до XVIII века — принималось астрономами. Кроме того,

он создал гелиоцентрическую систему мира, за что его называли «Коперником древности». Такое название не вполне точно, поскольку главное достижение Коперника состояло в использовании понятия относительности движения для объяснения видимого движения планет, что Аристарху было чуждо.

В сочинении Аристарха приведены выражения расстояния до светил и их диаметры, выраженные через радиус Земли, но нигде нет указаний на то, какова эта величина. Можно полагать, что хотя бы порядок ее был известен Аристарху, поскольку греческими мореплавателями совершались далекие путешествия.

Первое точное определение радиуса Земли на основе астрономических наблюдений было сделано Эратосфеном (276–194 гг. до н. э.) — географом и астрономом, одним из первых заведующих Александрийской библиотекой. Им было использовано то обстоятельство, что Александрия и город Сиена (ныне г. Асуан) находятся практически на одном меридиане. В день летнего солнцестояния Солнце в Сиене находится в зените, а в Александрии в то же время его отклонение от зенита составляет $1/50$ полной окружности. Этому значению разности высот соответствует измеряемое расстояние между городами, равное 5 000 стадиям (греческая мера длины, предположительно равная 157 м). Таким образом, длина окружности Земли получится равной 25 000 стадиям, что близко к ее современным определениям. В сочинениях древних авторов содержатся сведения о том, что Посидоний (135–51 гг. до н. э.) определял размеры Земли аналогичным методом, используя наблюдения разности высот яркой звезды Канопус. Когда на острове Родос звезда находилась на горизонте, в Александрии ее высота над горизонтом составляла $7^{\circ}.5$. Результат определения размера Земли таким путем оказался близким к полученному Эратосфеном.

Эратосфену принадлежит много сочинений, среди которых «География», «Хронография», «Измерение Земли», не дошедшие до нашего времени. С его именем связывают также определение угла наклона эклиптики к экватору, для которого было получено значение (в долях окружности) $11/83$, что в градусной мере составляет $23^{\circ} 51'$.

Крупнейшим астрономом эллинистического периода считают Гиппарха (185–126 гг. до н. э.), работавшего в обсерватории на острове Родос, который в то время был независимым и имел демократическую форму правления. Трактаты Гиппарха «О длине года», «Об интеркаляции месяцев и дней», «Об изменении солнцестояний и равноденствий» не сохранились и результаты его трудов стали известны только благодаря сочинению «Альмагест», принадлежащему Клавдию Птолемею (середина II в. н. э.). Содержание этого труда будет подробно изложено далее (полное его название «Тринадцать книг математического сочинения», название «Альмагест» дано при переводе арабами). Как сообщает Птолемей, Гиппарх был хорошо

знаком с результатами наблюдений движения Луны, затмений и других явлений, проводившихся ранее вавилонскими жрецами. Гиппарх уточнил среднюю продолжительность лунного месяца, получив величину, всего на 1^s отличающуюся от современного значения.

Между 162 и 128 г. до н. э. Гиппарх наблюдал девять солнцестояний и сравнивал результаты с данными наблюдений Аристарха, проводившихся более чем на сто лет ранее. Это сравнение привело его к выводу о том, что промежуток времени от одного солнцестояния (или равноденствия) до следующего такого же («тропический год») отличается от промежутка времени, по истечении которого Солнце занимает прежнее положение среди звезд (сидерический период обращения Солнца, или «звездный год»). По Гиппарху, продолжительность тропического года составляет $365^d 5^h 55^m 12^s$ (это более чем на 6^m ошибочно). По Гиппарху, различие между тропическим и звездным годами равно приблизительно 20^m и объясняется смещением точки весеннего равноденствия вдоль эклиптики в сторону, противоположную направлению движения Солнца. Величина этого смещения, названного прецессией («предварением»), по Гиппарху, равна $0^\circ.01$ ($36 \gg$) в год. Вследствие прецессии меняется только долгота, но не широта звезд. Отличие величины, полученной Гиппархом, от современной связано, возможно, с неточностью наблюдений, которые, как полагают, выполнялись посредством «экваториального кольца». При таких наблюдениях высота светила определяется по наклону кольца в момент, когда светило видно сквозь диаметрально противоположные отверстия в кольце.

Смелым шагом на пути развития астрономических знаний был отказ от устойчивого представления о положении Земли в центре окружности, по которой равномерно обращается Солнце. Неравномерность движения Солнца по эклиптике была обнаружена еще до Гиппарха — весной и летом оно движется быстрее, а осенью и весной — медленнее. Гиппарх, сохранив предположение о равномерности движения Солнца по окружности (как и других светил по своим кругам), сместил Землю в некоторую точку, придав ей таким образом эксцентрическое положение. При движении Солнца его расстояние от Земли должно изменяться — медленнее всего оно движется при наибольшем удалении, в апогее, а наибольшую скорость имеет в ближайшем к Земле положении — в перигее. Окружность, по которой происходит движение, называется эксцентром, а скорость этого движения представляет собой среднее за год ее значение. Долготы Гиппархом отсчитывались от точки весеннего равноденствия. Расстояние Земли от центра окружности — эксцентриситет — было оценено Гиппархом в $1/24$ ее радиуса, а для долготы точки апогея было получено значение $65^\circ 30'$. Указанным путем Гиппарх смог учесть действительную неравномерность движения Земли вокруг Солнца, обусловленную эллиптичностью земной орбиты. Использование геометрической модели для объяснения наблюдаемых

неравенств движения Солнца продемонстрировало прогресс науки в эллинистическую эпоху по сравнению с вавилонской астрономией.

Для истолкования неравномерности видимого движения Луны Гиппарх также использовал метод введения эксцента. Он пытался находить изменения видимых размеров Луны и Солнца, вызванные движением по эксцентру. Для определения углового диаметра светил использовалось специальное устройство — рейка с движущимися визирами.

Используя результаты наблюдений затмений, проведенных в Вавилоне, Гиппарх смог значительно уточнить соотношение между продолжительностями синодического и сидерического лунных месяцев, а также определить период обращения точки перигея Луны по орбите, оказавшийся равным примерно девяти годам. Было также установлено, что эксцентр наклонен к эклиптике под углом 5° . По продолжительности лунного затмения и величине углового диаметра Луны Гиппарх находил параллакс Луны. Им использовался также другой способ решения этой задачи — по разности фаз солнечного затмения в двух местах, широта которых известна — в Александрии и Геллеспонте. При этом было получено, что $r_C \approx 57R_C$.

До настоящего времени не потерял значения составленный Гиппархом каталог звезд (около 850 звезд) с указанием их эклиптических координат и оценки видимого блеска (звездной величины). Этот каталог с добавлением 170 звезд и с поправками долгот за прецессию приведен Птолемеем в «Альмагесте». Об инструментах, которыми пользовался Гиппарх при наблюдениях звезд, вошедших в каталог, ничего не сказано, но, возможно, это была армиллярная сфера (рис. 10). Не исключено, что составление Гип-

Рис. 10. Армиллярная сфера.

пархом каталога стимулировалось наблюдениями им вновь появлявшихся звезд (новых или переменных).

Кинематическая схема движения Солнца и Луны, предложенная Гиппархом, позволяет рассчитывать движение этих тел и предсказывать их положение. Методика таких расчетов воспроизведена Птолемеем в «Альмагесте». Видимая долгота Солнца λ при наблюдениях из точки \mathcal{T} меняется неравномерно. Аномалия M , определяемая как угловое расстояние

Рис. 11. Схема движения Солнца по Гиппарху: \mathcal{T} — точка наблюдения, \mathcal{O} — центр равномерных вращений, \mathcal{P} — положение Солнца, $\angle\Pi$ — долгота апогея, v — истинная аномалия, x — уравнение центра.

от апогея при наблюдениях из центра окружности, по которой движется Солнце, по предположению меняется со временем равномерно (рис. 11), и поэтому

$$M = M_0 + \mu(t - t_0).$$

Здесь μ — среднее суточное движение. «Средняя долгота» L определяется соотношением

$$L = M + \Pi = L_0 + \mu(t - t_0).$$

Из рисунка видно, что

$$x = M - v = L - \lambda, \quad v = \lambda - \Pi.$$

Из теоремы синусов следует равенство

$$\frac{\sin x}{\overrightarrow{OT}} = \frac{\sin v}{\overrightarrow{OP}}.$$

Величина $\frac{\overrightarrow{OT}}{\overrightarrow{OP}} = \varepsilon$ представляет собой эксцентриситет, и поэтому

$$\sin x = \varepsilon \sin v,$$

или

$$\sin(L - \lambda) = \varepsilon \sin(\lambda - \Pi).$$

В момент данного наблюдения неизвестны величины ε , Π , L . Если имеются три значения долготы λ_1 , λ_2 , λ_3 в соответствующие моменты t_1 , t_2 , t_3 , то неизвестные можно найти. Решая задачу геометрически, Птолемей определил значения ε и Π :

$$\varepsilon = \frac{1}{24.17}, \quad \Pi = 65^\circ 30'.$$

При этом он использовал данные о продолжительности весны и лета, принятые Гиппархом — $94\frac{1}{2}$ суток и $92\frac{1}{2}$ суток, по которым получал разности средних долгот.

Сложность задачи заключалась в необходимости точного определения моментов равноденствия и солнцестояния. Гиппарх использовал данные наблюдений за большие интервалы времени. Если известен точный момент солнцестояния, когда $\lambda = 90^\circ$ (или равноденствия — когда $\lambda = 0^\circ$), получается средняя долгота для любого момента времени.

В своих расчетах Птолемей принимал, что величина Π постоянна. Переменность долготы апогея Солнца была установлена гораздо позже арабскими астрономами. Это предположение привело к ошибке 5° в определении Π , тогда как расчеты положения апогея Гиппархом ошибочны всего на $(\frac{1}{3})^\circ$.

Полученное Гиппархом соотношение между x и M в тригонометрических терминах имеет вид

$$x = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon \sin M}{1 + \varepsilon \cos M},$$

что при $\varepsilon \ll 1$ приводит к выражению

$$x = \varepsilon \sin M - \frac{\varepsilon^2}{2} \sin 2M.$$

Теория движения по эллипсу, эксцентриситет которого равен e , дает следующее выражение для x :

$$x = 2e \sin M - \frac{5}{4} e^2 \sin 2M.$$

Если положить $\varepsilon = 2e$, то отличие использованного Гиппархом выражения x от точного составляет $\frac{3}{4}e^2 \sin 2M$. Величина эксцентриситета орбиты Земли равна 0.01675, а по Гиппарху $\frac{\varepsilon}{2} = 0.01674$. Наибольшая погрешность при нахождении долготы Солнца по Гиппарху равна $\pm 43 \gg$, что мало по сравнению с ошибками наблюдений того времени.

Гипотеза простого эксцентриситета Гиппарха при описании видимого движения Солнца дала хорошие результаты в определении изменений по долготе, но оказалась недостаточно точной, чтобы представлять изменения расстояния от Земли до светила — длины радиуса-вектора r . При изучении движения планет Птолемей, отказавшись от этой схемы, применил схему «биссекции угла» (рис. 12). Приняв отрезки OC и CT одинаковыми, Птоле-

Рис. 12. Схема биссекции угла по Птолемею: P — положение планеты, T — положение наблюдателя, O — центр равномерных вращений.

мей предложил считать, что равномерно вращается прямая PO , а не радиус PC . Таким образом, движение планеты по эксцентру не только кажется неравномерным для наблюдателя в T , но оно и реально неравномерно. Точку C называют эквантом («выравнивающей точкой»). Поскольку $x = \varphi + \psi$, то (в современной записи) из треугольников ΔTPO и ΔTPC следует

$$\sin \psi = \frac{\varepsilon}{2} \sin M, \quad \sin \varphi = \frac{\varepsilon}{2} \sin \vartheta, \quad \varepsilon = 2e,$$

и поэтому

$$x = \operatorname{arctg} \frac{\varepsilon \sin M}{\cos \psi + \frac{\varepsilon}{2} \cos M} \approx \varepsilon \sin M - \frac{\varepsilon^2}{4} \sin 2M.$$

При сравнении этого выражения с формулами для эллиптического движения видно, что по отношению к гипотезе «простого эксцентриситета» ошибка для величины x уменьшилась втрое. Что же касается погрешности r , то теперь она второго порядка по e . Кроме того, для r в апогее и перигее получаются такие же, как для эллипса, величины $r_\alpha = a(1 + e)$ и $r_\pi = a(1 - e)$.

При определении видимого из точки \mathcal{T} и равномерного (по окружности с центром в точке экванта) движения планеты сначала находится величина x_0 , соответствующая схеме простого эксцентриситета, а потом поправка к ней $x - x_0$. В таблице планетных неравенств, помещенной в «Альмагесте», Птолемей приводит величины x_0 и $x - x_0$ по аргументу M для Венеры, Марса, Юпитера и Сатурна. Каждое число получено путем решения множества прямоугольных треугольников с помощью таблицы хорд (т. е. синусов). Таким способом Птолемеем была разрешена проблема учета «первого неравенства», т. е. неравномерности движения планет в различных частях эклиптики.

«Второе неравенство» видимого движения планет заключается в наличии петель в их путях. Планеты Марс, Юпитер и Сатурн сначала отстают от Солнца и после «стояния» движутся попятным движением (от востока к западу) до следующего стояния. Меркурий и Венера обгоняют Солнце, двигаясь к востоку, затем останавливаются и, двигаясь попятно, отстают от Солнца, но затем снова догоняют его.

Для объяснения сложного видимого движения планет Птолемей использовал понятие эпицикла. Планета предполагается движущейся по окружности (эпициклу) с угловой скоростью σ , а центр эпицикла движется по другой окружности (деференту) с угловой скоростью ω (рис. 13).

Рис. 13. Схема эпициклического движения (подвижного эксцентра) для верхних планет:
 $T\mathcal{N}$ — радиус деферента, $\mathcal{N}\mathcal{P}$ — радиус эпицикла, $T\mathcal{Q}$ — радиус подвижного эксцентра.

Понятие эпицикла впервые встречается у геометра Аполлония Пергамского (около 200 г. до н. э.), доказавшего теорему о возможности замены эксцентрического движения равномерным эпициклическим движением. Теорию эпициклов далее развивал Гиппарх. Птолемей ее усовершенствовал и применил для объяснения движения планет, используя данные наблюдений. При этом он выдвинул два постулата:

- **Постулат 1.** Приходя в соединение с Солнцем, каждая из верхних планет одновременно приходит в апогей своего эпицикла и достигает наибольшего удаления от наблюдателя.
- **Постулат 2.** Пусть $\omega_3, \omega_4, \omega_5$ — средние скорости движения центра эпицикла по деференту, $\sigma_3, \sigma_4, \sigma_5$ — синодические скорости движения (по эпициклу), μ — среднее суточное движение Солнца по долготе. Тогда $\omega_3 + \sigma_3 = \omega_4 + \sigma_4 = \omega_5 + \sigma_5 = \mu$.

Как утверждается в «Альмагесте», эти условия выполняются с очень высокой точностью (до «сексты градуса», т. е. до $(\frac{1}{60})^6$ доли градуса). Обозначим через T и S периоды зодиакального и синодического периодов пла-

неты, а через A — продолжительность солнечного года:

$$T = \frac{360^\circ}{\omega}, \quad S = \frac{360^\circ}{\sigma}, \quad A = \frac{360^\circ}{\mu}.$$

Пусть на k солнечных лет приходится z оборотов длительности T и s оборотов длительности S . Тогда

$$T = \frac{kA}{z} = \frac{360^\circ}{\omega}, \quad S = \frac{kA}{s} = \frac{360^\circ}{\sigma}.$$

Из этих соотношений получаются равенства:

$$z = \frac{kA\omega}{360^\circ} = k \frac{\omega}{\mu}, \quad s = \frac{kA\sigma}{360^\circ} = k \frac{\sigma}{\mu},$$

и из них следует, что

$$z + s = k \frac{\omega + \sigma}{\mu}.$$

При $\omega + \sigma = \mu$ величина $k = z + s$. Этот вывод позволяет проверить справедливость второго постулата наблюдениями. Так, например, для Марса по Птолемею «37 синодических оборотов происходят за 79 лет 3 дня 5 часов 12 минут, и это совпадает с 42 возвращениями в зодиаке и сверх них еще $3^\circ 10'$ ».

В принятых выше обозначениях из указанного равенства следует, что

$$z = 42.00881, \quad s = 37.00000, \quad k = 79.00881.$$

Соотношение $\omega + \sigma = \mu$ оказывается выполняющимся с большой точностью. Из постулатов Птолемея выведено очень важное заключение:

Радиусы эпициклов трех верхних планет параллельны направлению, проведенному от наблюдателя к Солнцу. Поэтому радиусы эпициклов Марса, Юпитера и Сатурна всегда параллельны между собой (рис. 14).

Рис. 14. Эпициклы планет по Птолемею. Радиусы-векторы при движении внешних планет по эпициклам остаются параллельными направлению от Земли на Солнце.

Для Меркурия и Венеры соотношение между k , z и s имеет вид $k = z - s$.

Все планеты вращаются по своим эпициклам в прямом направлении со скоростью σ_i (относительно неподвижного направления), причем

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \mu - \omega_i, & \mu > \omega_i & \text{ для Марса } (i = 3), \text{ Юпитера } (i = 4), \text{ Сатурна } (i = 5), \\ \sigma_i &= \omega_i - \mu, & \mu < \omega_i & \text{ для Меркурия } (i = 1) \text{ и Венеры } (i = 2). \end{aligned}$$

На основе полученных соотношений по наблюдениям долготы λ составлялись эфемериды для планет. Величина λ определяется из соотношения

$$\lambda = l + x - y.$$

Здесь l — средняя долгота планеты, связанная со средней долготой Солнца следующим образом (для верхних планет):

$$l = L - \sigma t - \beta,$$

где β — постоянная величина. Для нижних планет $L = l$. Величина x находится способом, указанным выше. Через y обозначен угол, под которым из точки \mathcal{T} наблюдается радиус эпицикла (для верхней планеты) или деферента (для нижней).

По трем наблюдениям λ находятся величины $\varepsilon (= 2e)$, Π и l . Для учета изменений широты и получения наблюдаемых «петель» предполагался наклон эпициклов и деферентов к эклиптике. В случае Юпитера наклон равен соответственно $1^\circ.5$ и $2^\circ.5$.

Приведем высказывание известного астронома и историка науки Н. И. Идельсона о роли разработанной и примененной Птолемеем теории движения планет: «Древняя система описывала математическую картину реального мира. “Альмагест” — отнюдь не бредни варвара и не грезы пифагорейцев, это истинная теоретическая астрономия». Теория Птолемея имела важнейшее значение не только для практических приложений астрономии, но и для дальнейшего развития науки. Она распространялась как элемент античной культуры и за пределы эллинистического мира. В частности, около 400 г. н. э. в Индии появился трактат «Сурья Сиддханта» с изложением теории эпициклов и ее применений. В VI веке получило распространение сочинение Варах Махири «Панга Сиддхантика», в котором давалось упрощенное изложение теорий Гиппарха и Птолемея.

Лекция V

Астрономия в странах ислама (VIII – XIV века)

Достижения науки эллинистического периода, среди которых одним из важнейших было создание математической модели кинематики небесных светил, в III – IV веках становились известными в странах, с которыми Древний Рим вел торговлю, а значит, имел и культурные связи, в первую очередь в государствах Востока. В самой же Римской Империи с начала III века культура стала приходить в упадок в результате, с одной стороны, разложения государственного строя и, с другой стороны, из-за фанатизма адептов христианства, отрицавших всю «языческую» культуру и тем более науку. В V – VI веках распад поздне-античного общества углубился, и городская культура заменилась более примитивной сельской. «Мрак средневековья» царил в Европе в течение VII – X веков, и некоторое возрождение культуры началось лишь в XI – XII столетиях.

В культуре Византии (Восточной Римской Империи) доминировала церковная идеология, и весь государственный строй отличался застойным характером. Не говоря о естественных науках в целом, которых, по существу, в Византии не было, за всю ее историю не осталось никаких свидетельств о проводившихся астрономических наблюдениях или представлениях о мироздании, отличавшихся от религиозных. Комментарии к трудам античных философов появлялись, но в них имелось лишь стремление согласовать мысли древних авторов с догмами христианства.

Всплеск культуры и науки произошел на сравнительно близких к Византии территориях в VIII и последующих столетиях. На историческую сцену выступило государство, созданное народами, населявшими Аравийский полуостров — арабами. В южной части полуострова — более развитой — еще до VI века н. э. существовало государство с интенсивным сельским хозяйством и ремеслами, имевшее торговые связи со Средизем-

номорьем и Индией. В Китае и на Цейлоне в IV веке н. э. были арабские колонии.

Очень важным обстоятельством, послужившим в дальнейшем развитию астрономии, была потребность в ориентации во время далеких морских путешествий. Арабские мореходы были знакомы со звездным небом и движениями светил. Из названий звезд и астрономических терминов многие (более двухсот) имеют арабское происхождение.

Большая часть Аравийского полуострова была заселена кочевниками (бедуинами). Но через полуостров шли торговые пути с юга в Сирию, Египет и другие страны. Поэтому в западной его части располагались сравнительно богатые города, в том числе Мекка. Стремление к объединению различных арабских племен в одно государство выразилось в возникновении религии, которая могла служить этой цели — ислама. Житель Мекки Мухаммед (570–632) объявил себя пророком единого бога — Аллаха. Не встретив поддержки со стороны богатых горожан, в 622 г. Мухаммед со своими сторонниками переселился в Медину. В 630 г., после того как многие племена приняли учение Мухаммеда, ислам сделался единой религией арабов, а Мекка стала священным городом, в котором находится главная святыня ислама — «камень Кааба» (большой метеорит). Ислам включает в себя ряд элементов христианской и иудейской религий, а также многое из старых арабских культов. Быстрое распространение ислама не только среди населения Аравийского полуострова, но и народов соседних стран объясняется тем, что он отвечал их обычаям и духовным потребностям. В исламской религии большую роль играют обряды — необходимость ежедневной пятикратной молитвы («намаза»), месячного поста («рамадана») и другие. Новая религия оказалась агрессивной — мусульмане обязаны участвовать в «священных войнах» против «неверных», т. е. противников ислама.

При объединении арабов в одно государство, сильное в военном отношении в частности благодаря фанатизму воинов, создавались условия для завоевания больших территорий и возникновения, в итоге, огромной империи. К 640 г. в нее были включены Палестина и Сирия, а за следующие двадцать лет было завоевано все северное побережье Африки, Иран и даже земли Северного Кавказа. Сохранение местных обычаев и относительная веротерпимость по отношению к религиозным воззрениям населения завоеванных стран способствовали закреплению арабов на новых территориях и быстрому их освоению.

Правители арабского государства — халифы — сначала выбирались из числа родственников и приближенных Мухаммеда. Главной областью халифата стала Сирия, а его столицей — город Дамаск. В результате продолжавшихся завоеваний в халифат были включены территории Средней Азии, затем войска халифа вторглись в Индию, и в 711–712 гг. был завоеван

Пиренейский полуостров. Среди населения завоеванных стран распространялся ислам, а арабский язык стал государственным.

После ряда гражданских войн в 750 г. к власти в халифате пришла другая династия (Аббасидов), во время правления которой экономика и торговля стремительно развивались. Появились новые города, в 762 г. был основан Багдад, ставший столицей. В городах быстро развивались ремесла, велось строительство как светских (дворцовых), так и пышных культовых сооружений.

В халифат входило много стран с неарабским населением, обладавшим самобытной культурой. Взаимодействие культур, облегчавшееся тем, что арабский язык был общегосударственным, привело к возникновению арабомусульманской культуры, воспринявшей многое из сохранившегося культурного наследия эллинистического мира.

В странах халифата большое значение придавалось образованию, которое было преимущественно религиозным. Помимо школ (медресе) основывались университеты — в Кордове (755 г.), Багдаде (795 г.), Каире (972 г.). В IX – X веках в них стали изучаться и светские науки — математика, астрономия, медицина и другие. Создавалась литература различного характера. Уже в VIII веке в халифате производилась бумага для письма.

Многие из правителей халифата, обладавших неограниченной как светской, так и духовной властью, стимулировали развитие культуры и покровительствовали наукам — как из престижных соображений, так и в заботах о своем будущем. Науки, которые могли служить этим целям — медицина и астрономия, в древности неразрывно связывавшаяся с астрологией и предсказанием будущего — были предметами особого внимания.

Среди покровителей наук выделялся халиф Аль-Мамун, создавший в начале IX века в Багдаде «Дом мудрости» (подобие Академии Наук), в котором ученые разных национальностей и конфессий трудились над изучением сочинений древних авторов — философов, астрономов, медиков и их комментаторов, а также переводили эти произведения на арабский язык. Возглавил «Дом мудрости» не мусульманин, а несторианин (несторианство представляло собой одну из ветвей христианства, возникшую в Византии и распространенную в Иране). В переводах трудов по астрономии и математике и составлении комментариев к ним видную роль сыграл выходец из Месопотамии (язычник).

В «Доме мудрости» были библиотека и обсерватория. Ряд греческих рукописей, в том числе трактат Птолемея, названный его переводчиком на арабский язык Ибн-Юсуфом (786–833) «Китаб аль-маджист» («величайшее сочинение»), сокращенно «Альмагест», были переданы византийским императором халифу по мирному договору. Еще ранее (VIII в.) с индийского на арабский язык были переведены сочинения по астрономии с изложением теории Птолемея.

Повышенный интерес исламских ученых к науке о небесных светилах вызывался как практическими, так и духовными потребностями. В исламском мире летоисчисление велось (и продолжается) по лунному календарю, причем за начальную дату принят 622 г. («год хиджры»). Для создания и уточнения лунного календаря необходимо, как известно, достаточно полное знание неравенств видимого движения Луны, которое должны были изучать астрономы. Другой важной целью, ставившейся перед астрономами, было определение географического положения путешествующих по суше и по морю. Как было отмечено ранее, арабские мореплаватели совершали далекие рейсы задолго до появления исламской религии. Ведение торговли с различными странами делало необходимым более точные наблюдения положений небесных светил и составление географических карт.

Существенными чертами исламской религии являются требования обращения в направлении на Мекку при совершении намаза и соблюдения поста рамадан, который должен начинаться с первым появлением лунного серпа (новолуние) в западной части неба. Поэтому возникали задачи определения азимутов (знания направления север—юг), точного предсказания моментов восхода Луны, а также моментов восхода и захода Солнца. При решении этих задач нужно производить переход от эклиптической системы небесных координат к горизонтальной. Для решения сферических треугольников в IX – X веках исламскими математиками и астрономами был создан математический аппарат — сферическая тригонометрия — и инструмент, моделирующий преобразование координат — астролябия (рис. 15). С

Рис. 15. Схема астролябии: «паук» указывает положения ярких звезд.

помощью визира и градуированной шкалы находится высота Солнца (плоскость астролябии должна при этом располагаться вертикально). «Паук» поворачивается так, чтобы Солнце заняло на диске положение, соответствующее линии высоты, и находится часовой угол — между меридианом и часовым кругом Солнца.

Арабских астрономов занимала лишь техническая (прикладная) сторона астрономии — использование математических методов для решения конкретных задач. Что же касается концептуальных проблем, то исламские ученые должны были следовать букве Корана, в котором устройство мира истолковывается (как и в других религиях) с позиций, полностью расходящихся с современными научными взглядами.

На развитии астрономии в исламском мире благотворно сказалось расширение математических знаний путем использования достижений индийской науки, применения позиционной системы записи чисел и арабских цифр, что сильно упрощало вычисления. В 830 г. Аль-Хорезми было написано одно из первых математических сочинений, от наименования которого, содержащего арабское слово «аль-джабр», возникло слово «алгебра».

Ему же принадлежит перевод индийских таблиц, содержащих положения светил и отличающихся высокой точностью. Такие таблицы применялись для уточнения календаря и в астрологических целях.

Начало применению тригонометрических функций в астрономии, по существу, положил Птолемей, который составил и использовал таблицу хорд. Функция «синус», соответствующая половине длины хорды, использовалась в Индии и смысл индийского названия (ордхаджива) был искажен при переводе на арабский и затем с арабского на латинский язык¹. Остальные функции были введены арабскими астрономами в IX – X веках. В это время была доказана теорема синусов, а астроном Аль-Баттани (858–929) предложил формулу, определяющую косинус стороны сферического треугольника. Таким образом, был создан математический аппарат для решения главных задач, стоявших перед исламскими астрономами.

В IX веке появилось сочинение Аль-Фаргани, в котором упрощенно, без математических сложностей, излагались по Птолемею геоцентрическая система мира и элементы астрономии. Оно получило широкое распространение и в XII веке в Испании было переведено на латинский язык.

Астрономы из Багдада в первой половине IX века произвели измерение длины, приходящейся на один градус широты, для нахождения радиуса Земли и получили для него значение, близкое к найденному Эратосфеном.

В своих наблюдениях арабские астрономы использовали те же инструменты, что и Птолемей, добавив к ним астрольбию. Среди многих арабских астрономов, бывших опытными наблюдателями, Аль-Баттани, о котором уже упоминалось, считается наиболее выдающимся. Из наблюдений Солнца он определил долготу его апогея, отличавшуюся от использованной Птолемеем почти на 17° , и точное значение эксцентриситета. Таким образом, он был первым, доказавшим смещение апогея Солнца относительно звезд. Аль-Баттани с большой точностью определил длину года. Составленные Аль-Баттани на основе собственных наблюдений астрономические таблицы (такие таблицы обычно назывались «Зидж») представляли собой крупное достижение исламской астрономии. Им была уточнена величина угла между эклиптической и экватором, что позволило составить более точные, чем птолемеевские, эфемериды планет. В «Зидже» содержался каталог положений звезд, в котором птолемеевские данные были исправлены с учетом прецессии. В XII веке «Зидж» Аль-Баттани был переведен на латинский язык и приобрел большую известность среди европейских ученых. Коперник в своем труде его многократно цитировал.

¹При переводе на арабский сокращенно писали «джиб», но поскольку гласные опускаются, стали читать это слово как «джайб», что значит «карман» — по латыни «sinus».

Астроном Ас-Суфи (908–986) в своем сочинении «Книга неподвижных звезд» привел, помимо исправленных им по собственным наблюдениям положений звезд, содержащихся в каталоге Птолемея, их звездные величины.

В X веке Аббасидский халифат, территория которого простиралась от Индии и Средней Азии до Испании, распался на отдельные государства, развивавшиеся более или менее самостоятельно. При этом образовывались новые центры культуры. В частности, в Египте, находившемся тогда под властью султана Аз-Хакима, возник научный центр «Дом знания», размещавшийся в Каире. Там астрономом Ибн-Юнусом (950–1009) был опубликован трактат под названием «Хакимов Зидж», содержащий, кроме таблиц движения Солнца и Луны, также описания способов их вычисления и наблюдавшихся как им, так и другими соединений планет и затмений. Этими таблицами пользовались в течение нескольких столетий.

В Хорезме (на территории нынешнего Узбекистана) родился и долгое время работал крупный ученый исламского мира Бируни (973–1048). Ему принадлежит множество сочинений по различным областям науки — географии, математике, истории — и среди них более тридцати посвящено астрономии. Астрономические наблюдения Бируни проводил, используя созданные им самим инструменты. Самым совершенным был стенной квадрант с радиусом дуги, равным 7.5 м. Бируни с высокой точностью определил наклон эклиптики к экватору и нашел скорость изменения этой величины. Используя оригинальный метод определения размера Земли по измерениям угла понижения горизонта при наблюдениях с горы, Бируни получил очень близкую к действительной величину радиуса $R_{\oplus} = 6345$ км. В главном астрономическом сочинении Бируни «Канон Масуда», помимо описания различных календарей, основ сферической тригонометрии и обычных для исламских астрономических сочинений рецептов астрологического прогнозирования, содержатся изложение теории движения Солнца и Луны, теории затмений, таблицы и каталог положений 1029 звезд по Птолемею и Ас-Суфи.

Среди астрономов Средней Азии был и известный поэт Омар Хайям (1048–1122). Он, в частности, возглавлял комиссию в г. Мерв по реформе календаря, приняв продолжительность цикла в 33 года (из них 8 високосных). Таким образом, средняя продолжительность года составила 365.24242 дня, что приводит к ошибке в один день за 4500 лет. Омару Хайяму принадлежит также авторство сочинения «Алгебра».

На завоеванном арабами Пиренейском полуострове (за исключением Астурии) существовало (с 750 года) независимое государство — Кордовский эмират, лишь формально подчиненное халифу в Багдаде. После распада империи Аббасидов в X веке оно стало называться Кордовским халифатом. Экономика и культура развивались в нем интенсивнее, чем в странах Ближнего Востока — это относилось к различным ремеслам, добыче и

обработке металлов, производству тканей. Между Кордовским халифатом и странами Западной Европы существовали тесные торговые и культурные связи. В Кордовском университете учились студенты из других европейских стран.

Астрономы, жившие в Кордовском халифате в XI веке, продолжая свою деятельность по составлению таблиц с эфемеридами — т. н. «Толедские таблицы» движения планет были изданы во второй половине века — стали критически пересматривать основы теории движения небесных тел, созданной Птолемеем. При этом они исходили из религиозных догм и общепhilosophических соображений. Критике подвергалась правомерность введения понятия экванта, как противоречащего системе «твердых тел планет» (по Аристотелю) и эксцентричность деферентов, лишавшая Землю ее положения в центре мира. Некоторые из астрономов отвергали и всю теорию движения по эпициклам.

Кордовский халифат просуществовал до середины XIII века. После упорной борьбы с арабами-мусульманами в 1137 году на северо-западе полуострова сформировалось христианское государство Кастилия, имевшее смешанное население и феодальную структуру. Продолжая войну с мусульманами, кастильцы в 1236 году захватили Кордову, где была сожжена богатая библиотека. После этого развитие астрономии на Пиренейском полуострове сильно замедлилось. Однако расширение мореплавания требовало продолжения работы над составлением эфемерид. Король Кастилии Альфонс X, собрав астрономов из разных стран, поручил им составление новых таблиц. Работа по их составлению была закончена к 1252 году. Полученными «Альфонсовыми таблицами» пользовались в течение двух столетий. В XV веке в Саламанке Зануто создал другие таблицы, также применявшиеся в навигации. По ним в Португалии составлялось издание типа морского ежегодника.

В XIII веке произошел подъем астрономической науки в восточной части распавшегося Багдадского халифата. Правивший там после завоевания монголами этих областей внук Чингиз-хана приказал построить в Маргане (близ города Тебриз) большую обсерваторию. Организатором строительства и главным наблюдателем стал известный к тому времени астроном Ат-Туси (1201–1274). В обсерватории, сооруженной на высоте 1600 м над уровнем моря, был установлен большой квадрант с радиусом дуги, равным $3\frac{1}{2}$ м. В ней имелась также обширная библиотека. На основе многолетних наблюдений Ат-Туси были созданы «Ильхановы таблицы» движения Солнца, Луны и планет. О точности наблюдений можно судить по найденному значению постоянной прецессии $51''.4$ за год, что достаточно близко к современной величине.

Подобно кордовским астрономам, Ат-Туси не был согласен с кинематической схемой Птолемея, в особенности с допущением неравномерности

движений и введением понятия экванта. Им была предложена другая кинематическая модель, в которой для каждой планеты вводилось дополнительно два эпицикла. Предполагая сочетание двух равномерных вращений с угловыми скоростями, соответственно равными ω и -2ω , Ат-Туси получил тот же эффект, который дает введение эксцентра, т. е. неравномерность видимого движения планет. Тем не менее, в этой схеме центры деферентов по предположению остаются смещенными. В дальнейшем астрономы из Дамаска сумели создать кинематическую модель движения небесных сфер, исключаящую введение экванта. Отметим, что использованная Птолемеем отчетливая кинематическая схема отвергалась по идеологическим соображениям и заменялась моделью движения, в еще большей степени не соответствующей реальности.

Сопrotивление схеме Птолемея и возвращение к модели Евдокса и Аристотеля обосновывалось философами. В Испании астроном и философ Ибн Рушу (Аверроэс) отзывался о системе Птолемея следующим образом: «Предполагать существование эксцентрической сферы или эпицилической сферы — значит противоречить природе».

В многолетнем — в течение семи веков — и, в целом, плодотворном развитии астрономии в странах ислама в XV веке произошел еще один взлет — на этот раз в государстве, созданном Тимуром и охватившем большую часть Юго-Западной Азии. Столицей этого государства являлся один из важных центров Востока — Самарканд, в котором было построено много выдающихся сооружений. Внук Тимура Улугбек (1394–1449) в 15 лет стал правителем Самарканда и прилегающих областей. При нем были сооружены грандиозные здания учебных заведений (медресе).

С раннего возраста Улугбек пользовался богатой библиотекой своего деда для самообразования и оказался просвещенным правителем. В построенных к 1420 г. зданиях медресе он устроил университет, для преподавания в котором были приглашены известные ученые, в том числе и астрономы. Через несколько лет Улугбеком была создана недалеко от Самарканда большая обсерватория, главным инструментом которой был огромный квадрант (по некоторым сведениям, секстант). Часть его находилась в высеченной в скале траншее, а другая часть — снаружи. Наземная часть дуги возвышалась над поверхностью земли приблизительно на двадцать метров, а глубина траншеи, в которой расположена сохранившаяся до нашего времени часть дуги (от 57° до 80°), равна одиннадцати метрам (рис. 16). Квадрант размещался в плоскости меридиана и использовался для наблюдений кульминаций Солнца, Луны, планет и опорных звезд. Точность наблюдений доходила до $1'$. Более слабые звезды наблюдались, возможно, с помощью армиллярных сфер. Кроме этого, в обсерватории имелись секстант, астролябии и другие угломерные инструменты. Из наблюдений Солнца были определены наклон эклиптики к экватору

Рис. 16. Обсерватория Улугбека по Самаркандом: сохранившаяся (подземная) часть квадранта (вид после раскопок, 1910 г.).

($\varepsilon = 23^{\circ}30'17''$, погрешность $32''$) и широта обсерватории.

Главное астрономическое сочинение Улугбека — «Новые Гурганские таблицы» (названные по его имени). В нем приведены экваториальные координаты более чем тысячи звезд, причем для большинства из них (около 700) использованы наблюдения самого Улугбека. Точность таблиц ($\approx 15'$) для того времени высокая. Во введении обсуждаются различные системы летоисчисления и помещены таблицы тригонометрических функций (для синуса — с шагом $1'$, для тангенса до 45° — шаг $1'$, от 45° — шаг $5'$). Очень высокая точность таблиц достигнута интерполированием и использованием метода последовательных приближений. В 1638 г. Гривс (из Оксфордского университета) вывез каталог в Англию и осуществил его перевод. По отзыву Лапласа, «... новый каталог звезд и астрономические таблицы — лучшие из тех, что существовали до Тихо де Браге».

В сочинении Улугбека также подробно описаны способы решения задач практической астрономии — определения координат светил и географических координат. Сообщено также об изучении движений планет. Найденные скорости движения планет (годового) отличаются от точных значений на $2'' \div 3''$.

Улугбек был убит политическими противниками, а обсерватория разрушена религиозными фанатиками. Астрономическая школа Улугбека распалась, и развитие астрономии на Востоке прекратилось на сотни лет. Остатки обсерватории археологам удалось обнаружить только в начале XX века.

Выдающаяся роль в истории астрономии ученых из стран ислама заключается в том, что благодаря им удалось сохранить достижения античной астрономии и создать ту основу для наблюдений, которая обеспечила развитие астрономии в Европе во второй половине тысячелетия.

Лекция VI

Возрождение культуры и науки в Европе; возникновение университетов (XI – XV века)

Расширение Римской империи в I – II веках н. э. сопровождалось распространением античной культуры на завоеванные области Европы. Создавались крупные города, построенные по образцу римских — Лютеция (Париж) в Галлии, Лондиний (Лондон) в Британии, Кордуба (Кордова) в Испании и другие. Строились хорошие дороги, культовые сооружения, амфитеатры. Местное население усваивало некоторые элементы культуры завоевателей. Ослабление империи, происходившее начиная с III века, вызванное экономическими и политическими причинами, а также усилением центробежных устремлений окрестных областей, не могло прекратиться даже после принятия христианства как религии, способной объединить разнородное общество.

В III – IV веках на территорию Римской империи неоднократно вторгались племена варваров (так римляне называли людей с иным, чем латинский, языком), главным образом германских — франков, бургундов, вандалов, а также готов из Восточной Европы. Ими воспринимались некоторые обычаи и элементы материальной культуры римлян, но вместе с тем происходило снижение уровня — «варваризация» — общей культуры.

Готы, образовавшие племенной союз, распространяли свою власть на большую территорию. В IV веке расселившиеся в пределах Римской империи готы (вестготы) восстали против Рима, в битве под Андрианополем

(Балканский п-ов, 378 г.) нанесли поражение римским войскам и подошли к Константинополю — столице Восточной Римской империи. Этими событиями государство было ослаблено и не смогло противостоять натиску варварских племен. После того, как в 410 г. готы и вандалы захватили и разграбили Рим, существование Западной Римской империи фактически завершилось. Готы на территории Галлии и Испании создали свое королевство и, приняв христианство, ассимилировались с местным населением.

Кочевые племена гуннов, пришедшие из глубин Азии, на своем пути разграбили многие из государств, созданных варварами на территории почти распавшейся Римской империи. После того, как гунны вторглись в Галлию, оставшиеся силы Западной Римской империи все же объединились с войсками варварских государств и в битве на Каталаунских полях (около Труа) в 451 г. разбили войско гуннов, которым командовал их предводитель Аттила. Через четыре года вандалы, создавшие в Средиземноморье свое королевство, снова разграбили Рим. В 470 г., когда последний император (находившийся не в Риме, а в Равенне) был лишен власти одним из военачальников варварского племени скиров, Западная Римская империя перестала существовать и формально.

Из созданных варварами к этому времени государств наиболее крупное и сильное существовало на территории Галлии и части Германии. Оно было образовано путем объединения всех франкских племен Хлодвигом, ставшим королем (династия Меровингов) и правившим с 481 по 511 гг. Он принял христианство. В VI – VII веках в государстве франков стала развиваться феодальная структура, появилось крупное землевладение, что способствовало интенсификации сельского хозяйства. В междоусобных войнах династия Меровингов потеряла реальную власть. Новая династия Каролингов (в конце VII века) расширила территорию государства за счет германских племен, но на юге пришлось вести борьбу с вторгшимися с Пиренейского полуострова в южную часть Галлии (Аквитанию) арабами. В 732 году арабам было нанесено тяжелое поражение (битва при Пуатье), что прекратило их продвижение на север Галлии. Однако борьба с арабами продолжалась еще сотни лет.

Выдающийся полководец и государственный деятель Карл Великий (768–814) проводил успешную завоевательную политику с целью создания империи по образцу римской. Она включила в себя земли от реки Эбро и Барселоны (Испания) до Эльбы и Балтийского моря и от Ла-Манша до Дуная и Адриатики. В 800 г. Карл был коронован в Риме папой и получил титул императора Священной Римской империи. В эту империю входила и наиболее развитая в отношении культуры область Европы, занимавшая территорию Аппенинского полуострова (Италия).

В правление Карла была упорядочена государственная структура. Территория государства разделялась на графства, управляемые королевскими

уполномоченными — графами. Большой властью и привилегиями были наделены епископы христианской церкви, которая владела землями включая монастырские. Таким образом, сформировалась феодальная структура государства, но оно как по степени своей организации, так и по культуре не походило на империю, созданную Древним Римом. Биограф и современник Карла Великого пишет, что «он обладал красноречием, знал несколько языков, в том числе латинский, занимался науками и делал попытки овладеть искусством письма, но труд его, так поздно начатый, имел мало успеха».

Тем не менее поскольку для государственной службы и церкви нужны были грамотные люди, то, как свидетельствует один из историков, по совету близкого к королю англосакса Алкуина, назначенного аббатом Турского монастыря, в империи стали распространять образование: «Король вывез с собой учителей математики и счетной науки из Рима во франкскую землю и повсюду распространял изучение этих наук». Монополия на образование принадлежала церкви. Алкуин организовал подобие литературного общества с участием Карла, членов его семьи и сановников двора. В некоторых монастырях стали собирать и переписывать рукописи античной эпохи. Большой интерес к трудам античных авторов по различным областям знания — истории, географии и другим — проявлял также король англо-саксонского государства Альфред (874–900), занимавшийся их переводом и комментированием.

В 841 году состоялся раздел империи между внуками Карла Великого — в основном по этническому признаку — на три государства, впоследствии, после ряда переделов, превратившихся в Италию, Францию и Германию.

Несмотря на многочисленные войны как между возникшими государствами, так и отдельными феодалами, а также на ущерб, вызванный крестовыми походами, экономика европейских государств в IX – XI веках постепенно укреплялась. Произошло оживление сохранившихся античных городов, особенно в Италии (Павия, Генуя, Пиза, Венеция, Болонья и др.), в них концентрировались ремесленники. Выросла торговля с Византией, странами Балканского полуострова, Египтом, Ираном. Это вызвало развитие мореплавания и строительство новых портовых городов.

Как уже отмечалось, земля в большей части принадлежала крупным собственникам. Тем не менее производительность труда использовавших эту землю крепостных и арендаторов была значительно выше, чем в рабовладельческом обществе. Поэтому сельское хозяйство Европы интенсифицировалось, отчасти благодаря климату, более благоприятному для земледелия и животноводства, чем во многих странах Азии.

Выражением феодальной раздробленности в европейских странах явилось повсеместное строительство замков, откуда осуществлялось руководство той или иной областью. Вместе с тем замок оказывался крепостью во

время войны между феодалами. Возле замков и на торговых путях возникали новые города, и в этих городах население увеличивалось за счет прибытия избыточного сельского населения. Видную, а часто и главную, роль в городах играли купцы и ремесленники. В процессе заселения городов сказывалось происходившее разделение труда — занятие ремеслом отделялось от сельскохозяйственной деятельности. Это отличало европейские города от полисов на Древнем Востоке, где они часто представляли собой просто большие поселения.

Города обычно были расположены на территориях, принадлежавших королю или крупным феодалам, и подчинялись им. Горожане боролись за самоуправление, освобождение от пошлин и другие привилегии. Наиболее богатые из городов сами стали, в конечном итоге, государствами — например, Флоренция и Венеция в Италии, Любек и Бремен в Германии. Во Франции многие города превратились в полуавтономные коммуны со своими магистратами. В Англии к началу XIII века половина городов имела самоуправление. Таким путем возникло сословие «горожане», свободное от крепостной зависимости. Эта особенность европейской истории сыграла важнейшую роль в развитии материальной и духовной культуры.

Для развития европейской культуры важное значение имело то, что большинство стран находилось на территории бывшей Римской империи. Общность многих унаследованных от Рима обычаев, наличие одного развитого языка общения разных народов — латинского — в сильной мере облегчало взаимодействие различных культур и в особенности научный прогресс.

Возникновение и рост городов сопровождался повышением роли «светской» культуры, создававшей отличное от церковного мировоззрение. В их жителях появлялось стремление к расширению знаний о мире, к освобождению мысли от гнета религиозных предрассудков. С другой стороны, совершенствование ремесел связано с необходимостью развития техники, а это вызывало потребность не просто в грамотных людях, но в специалистах, обладающих достаточно широким кругозором. Оба эти обстоятельства привели к возникновению образовательных учреждений более высокого уровня, чем существовавшие еще в IX – X веках монастырские школы, где подготавливались будущие служители церкви — клирики, и соответственно образование ограничивалось тем, что необходимо для богослужений. Из таких школ выпускались и просто грамотные люди — например, писцы.

Школы другого типа — при епископских кафедрах и соборах в городах — давали более широкое образование. Они имелись в Йорке и Кентерберии в Британии, при Соборе Парижской Богородицы во Франции, в Милане и Парме — в Италии, и в ряде других городов. Такие школы послужили основой для организации университетов.

В 1174 г. Парижская школа была освобождена папой римским от подчинения королевскому суду. В 1200 г. это было подтверждено королевской привилегией, и этот год считается началом существования университета. Первый устав его был утвержден в 1215 г. Как ответвления Парижского университета, в 1229 г. образовались университеты в Тулузе и Орлеане. Еще в XII веке сформировались высшие школы в Болонье и Салерно. В 1209 г. в Англии был образован университет в Оксфорде, а через несколько лет как его филиал — в Кембридже (последний получил привилегию только в 1318 г.).

Парижский университет назывался “*Universitas magistrorum et scholarium*”. Система образования в нем, как и в епископских школах, была взята от античной традиции, сформулированной Боэцием (525 г.). Изучались семь «свободных искусств». Они разделялись на два цикла:

тривий: грамматика, риторика, диалектика;

квадривий: астрономия, музыка, геометрия, арифметика.

Все «пути знания» следовали классикам античной науки. Диалектика изучалась с использованием логики Аристотеля, астрономия — по Птолемею, геометрия — по Евклиду и арифметика — по Пифагору. Преподавание велось на латинском языке. Обучение было всеобщим — для всех желающих.

Впоследствии помимо общего факультета «искусств» обособилось еще три: медицинский, теологический и юридический.

В университетах существовали «колледжи», представлявшие собой по существу общежития для бедных студентов. К XVI веку они оставались только в Оксфорде и Кембридже. Колледжам выделялась земля для получения доходов. Управляющий колледжем (*warden*) поддерживал в нем строгую дисциплину.

В XIV веке возникли университеты в Германии (Гейдельбергский и другие), в Чехии (Пражский), в Польше (Краковский). К концу XV века в Европе насчитывалось уже 65 университетов, причем к этому времени относится расцвет итальянских университетов в Пизе, Падуе, Болонье, пользовавшихся большой известностью.

В лучших епископских школах и тем более в университетах обучение не ограничивалось слушанием лекций профессоров (магистров, доцентов), усвоением их содержания и его философского обоснования, дававшегося, как правило, в духе учения Аристотеля. Из этих школ и университетов выходили люди не только грамотные, но и духовно развитые, знакомые с античной культурой, произведениями греческих и исламских авторов. При крестовых походах европейцы также имели возможность ознакомиться с культурой Востока. В монастырях сочинения Птолемея, Архимеда и других ученых, переведенные на латинский язык, переписывались и оттуда распространялись. В этом отношении выделялся основанный в начале VIII века известный монастырь на горе Сен-Мишель (Нормандия). Там с IX по

XV века переписывались и копировались не только сочинения религиозного содержания, но и «светские». Многие из этих манускриптов сохранились до наших дней. Один из них, относящийся к XII веку, содержит научные трактаты, относящиеся к описанию инструментов (астролябия), часов, сфер планет и другим астрономическим вопросам. На одной из имеющихся в манускрипте многочисленных иллюстраций изображен астроном, наблюдающий Полярную звезду с помощью визирного устройства (рис. 17). По-видимому, подобные манускрипты служили учебными пособиями для

Рис. 17. Астроном, наблюдающий Полярную звезду: иллюстрация из манускрипта XII века.

студентов Сорбонского и других университетов.

В университетах происходила идеологическая борьба между сторонниками различных толкований учений «отцов церкви» и других вопросов теологии. В принятом католической церковью учении Аристотеля содержалось много утверждений, не согласовавшихся с библейскими текстами. Рациональный подход к наблюдаемым явлениям считался вольнодумством.

Главное направление университетской науки в XII – XIII веках состояло в стремлении к систематизации религиозных взглядов и сочетании их с взглядами на мир античных философов, в первую очередь Аристотеля. Такое объединение называлось схоластикой. Для схоластики характерно предпочтение логических рассуждений и умозаключений повседневному опыту. Один из ведущих представителей этого метода философ Фома Аквинский утверждал, что «наука — служанка богословия». Должна существовать гармония между верой и разумом, но приоритет отдается вере.

Противоречащими далекому от реальности отношению схоластов к науке были взгляды английского монаха Роджера Бэкона, который считал, что в познании природы главная роль должна отводиться опыту. Ему принадлежит ряд изобретений и, кроме того, известно, что он проводил химические эксперименты. Став основателем научного направления, названного эмпиризмом, Роджер Бэкон за свои воззрения жестоко преследовался католической церковью.

Для астрономов IX – XIII веков — а ими были почти исключительно исламские ученые — цель науки заключалась в возможно более точном исследовании движений небесных светил, и в этом они добились значительных успехов. Природа наблюдаемых явлений их не очень интересовала, они довольствовались тем, что об этом было написано Аристотелем. В европейских же университетах через схоластические диспуты прорывалось желание выйти за рамки античных представлений о строении мира. Это выразилось в сочинениях на астрономические темы ученых Сорбонского университета Ж. Буридана (1300–1358) и Н. Орема (Парижского) (1323–1382). В своем сочинении «Вопросы к четырем книгам о небе и о вселенной Аристотеля» Буридан подверг сомнению утверждения о центральном поло-

жении Земли во Вселенной и о ее неподвижности. В качестве альтернативы последнему он считал возможным, что движение звездной сферы является кажущимся — на самом деле вращается Земля, совершая за сутки полный оборот. Таким образом возродилось высказывавшееся еще в античное время мнение о зависимости видимого движения от положения наблюдателя, т. е. об относительности движения. Эти идеи развивал ученик Буридана Орем, указавший на невозможность доказательства того, что Земля неподвижна, путем каких-либо наблюдений.

В том же направлении — с критикой господствовавших концепций Аристотеля — выступил, смело для церковного иерарха, кардинал Николай Кузанский (1401–1464). Он считал, что Вселенная не может быть ограниченной, а также полагал, что Земля и Солнце не находятся в центре Вселенной. По его мнению, Земля представляет собой небесное тело, подобно Солнцу и Луне. Николай Кузанский был сторонником идеи об относительности движения, утверждая, что «каждому, пусть находится он на Земле, на Солнце или на любой другой планете, всегда будет казаться, что он находится в неподвижном центре, в то время как все остальные предметы движутся».

В европейских университетах астрономическая деятельность в течение XII – XIII веков ограничивалась общенаучными философскими соображениями об устройстве Вселенной, а наблюдения производились редко и были повторением наблюдений, проводившихся астрономами исламских стран. Но сочинения по астрономии переводились на латинский язык и широко распространялись. Англичанин Джон Холивуд (Сакробоско) из Парижского университета на основе «Альмагеста» и сочинений исламских астрономов в первой половине XIII века создал трактат «О сфере Вселенной», в течение сотен лет использовавшийся в качестве учебника астрономии. В этом трактате в упрощенном виде изложена теория планетных движений. Австрийский математик Георг Пурбах (1423–1461) дал полную теорию эпициклов Птолемея в сочинении «Новая теория планет», сумев сочетать ее с моделью твердых сфер, с которыми, по концепции Аристотеля, скреплены планеты.

В качестве ученика Пурбаха, а затем помощника в его наблюдениях работал Иоганн Мюллер, родившийся в 1436 г. в германском городе Кенигсберге (Франкония) и в дальнейшем известный под именем Региомонтан — по названию места его рождения (*Mons Regium*, «королевская гора»). Пурбах и Региомонтан обнаружили, что использование Альфонсовых таблиц приводит к значительным (до нескольких градусов) ошибкам. Чтобы выяснить причины этого и составить более точные таблицы, Региомонтан поселяется в Италии, изучая греческие рукописи, относящиеся к астрономии, и копируя их. Затем он с целью ознакомления с аналогичными рукописями переехал в Венгрию. К этому времени И. Гутенбергом

уже было изобретено книгопечатание. Вернувшись в 1471 г. в Германию (Нюрнберг), Региомонтан создал типографию специально для печатания астрономических сочинений. После издания труда Пурбаха «Теория планет», затем календарей и своих «Эфемерид» имевшиеся планы печатания переводов работ античных астрономов и математиков были нарушены. В 1475 г. Региомонтан был вызван папой в Рим для проведения реформы календаря, связанной с уточнением дат празднования Пасхи. В 1476 г. он умер, находясь в Риме. Выполненный им перевод «Альмагеста» на латинский язык был издан лишь в 1496 г.

Составленные Региомонтаном астрономические таблицы содержали предвычисленные положения Солнца, Луны и планет на 32 года — с 1475 по 1506 год. При составлении «Эфемерид» Региомонтаном широко применялась сферическая тригонометрия, причем им были составлены таблицы синусов (с шагом $1'$) и таблицы тангенсов. «Эфемериды» оказались значительно более точными, чем Альфонсовы таблицы. Ими пользовались Колумб и Америго Веспуччи при своих плаваниях в Америку.

Ученик Региомонтана Бернгард Вальтер устроил в своем доме обсерваторию, где производились наблюдения Солнца, Луны и планет, продолжавшиеся и после смерти Региомонтана до 1504 г. В результате были получены долговременные ряды данных о координатах светил, использованные астрономами в последующие годы.

В качестве инструментов Региомонтаном и его сотрудником служили трикветрум (рис. 18), о котором писал еще Птолемей, жезл Якоба («Посох Иакова», рис. 19) и армиллярная сфера. При наблюдениях достигалась

Рис. 18. Трикветрум — инструмент для определения зенитных расстояний светил. Наклонная рейка градуирована с большой точностью.

точность, более высокая, чем у Гиппарха и других наблюдателей эллинистического периода (около $1'$).

Рис. 19. Жезл Якоба («Посох Иакова»), применявшийся для определения высоты светила над горизонтом.

Региомонтаном наблюдались также кометы — в 1456 г. и в 1472 г. Попытки определить их расстояния от Земли привели к выводу о том, что они являются небесными объектами, не связанными с «подлунным миром». Еще одним новым и важным обстоятельством была попытка последователей и учеников Региомонтана учесть влияние рефракции на видимое положение Солнца вблизи горизонта. Это стало первым из известных обращений астрономов к изучению физических явлений, незнакомых античным и исламским наблюдателям.

К концу XV века астрономы Европы перешли от освоения и истолкования научных результатов наблюдений, выполненных до них, к получению

нового знания. Этот этап развития астрономии совпал по времени с эпохой Возрождения, когда изменилось отношение к искусству, литературе и науке, создатели которых освободились от фанатизма, присущего ортодоксальной религии. Деятели науки эпохи Возрождения ставили целью своего творчества развитие личности и освобождение духовной жизни от паутины предрассудков. Для этого не было возможности в обществах Востока и там, где господствовал исламский фундаментализм. Формы научной деятельности в Европе стали приходить в соответствие с выросшими потребностями общества. Необходимость получения новых знаний о природе была вызвана начинавшимся преобразованием феодального общества, которое нуждалось в прогрессе техники и технологии, открытии новых земель и в духовно свободных личностях, способных выполнять эти задачи.

Лекция VII

Астрономия в Европе в XVI веке.

Обоснование Коперником гелиоцентрической системы мира

В первой половине XVI века произошел переворот в развитии астрономии, отразившийся на всей системе естественных наук. Он совершился благодаря трудам крупнейшего польского ученого Николая Коперника, обосновавшего гелиоцентрическую систему мира. Изменив представления о месте Земли во Вселенной, он тем самым создал основу нового мировоззрения. Лишив Землю центрального положения, Коперник бросил вызов самым устойчивым из религиозных догм, и поэтому распространение его теории встретило сильнейшее сопротивление клерикальных кругов, а его труд был внесен в список книг, запрещенных католической церковью.

Коперник родился в 1473 г. в городе Торунь, который находился тогда в области, ранее принадлежавшей Западной Пруссии. В XIII веке на этой территории рыцари Тевтонского ордена (слившегося с Орденом меченосцев), вернувшиеся в Европу после крестовых походов, насаждали христианскую веру среди пруссов, заселявших прилегавшие к Балтийскому морю северо-восточные области Польши, и захватывали при этом польские земли. Войска Ордена потерпели поражение от польско-литовских сил в Грюнвальдской битве (1410 г.), и ослабевший в ходе продолжавшейся войны Орден вынужден был заключить в 1466 г. Торуньский мир, по которому многие земли Восточного Поморья и Западной Пруссии отходили Польше. Среди этих земель была Вармия, формально принадлежавшая Польше,

но фактически являвшаяся самостоятельной областью под управлением церкви. Это управление осуществлял Варминский епископ при посредстве капитула кафедрального собора, состоявшего из высокопоставленных чиновников — специалистов по каноническому (церковному) праву. Они назывались канониками.

Отец Коперника, переселившийся в Торунь из Кракова, занимал видное положение в торговых кругах. Когда Николаю было девять лет, он умер, и заботу об осиротевших детях взял на себя брат матери Лука Ватцельроде, бывший тогда каноником Фромборкского собора, а с 1489 года ставший епископом. Он был высокообразованным человеком, учившимся в Краковском, а затем в Болонском университетах. В 1491 г. Ватцельроде отправил племянника на обучение в Краковский университет с тем, чтобы впоследствии он мог стать каноником.

Сравнительно «молодой» Краковский университет к тому времени, когда там учился Коперник, приобрел известность в Европе. Астрономию в нем преподавал по учебнику Пурбаха Войцех Брудzewский, составивший к этому учебнику комментарий. Поэтому Коперник уже в первые годы обучения мог получить знания по современной ему астрономии. Однако углубленное изучение трудов Птолемея и других античных авторов в Краковском университете было для Коперника невозможным, так как греческий язык в университете не преподавался.

После трехлетнего обучения в Кракове Коперник вернулся в Фромборк, но, не получив ожидавшейся им должности каноника, уехал в Италию, где в 1497 году поступил в Болонский университет. Продолжая изучать, помимо гуманитарных дисциплин, астрономию, он даже участвовал в наблюдениях. Вернувшись в 1501 г. во Фромборк, в 1503 г. он снова уезжает в Италию для изучения медицины в Падуанском университете. Получив степень доктора канонического права, Коперник в 1506 г. возвратился на родину высокообразованным человеком, овладевшим богатством мировой культуры своего времени, и, кроме того, знающим медицину. Последнее было немаловажным для его дяди-епископа, много болевшего. После смерти Ватцельроде в 1512 г. Коперник обосновывается во Фромборке, где занимается также административной деятельностью. Во время военных действий между Орденом и Польшей ему даже пришлось руководить обороной Фромборка. Продолжая заниматься делами управления в существовавшей в то время сложной политической обстановке в Вармии, Коперник находит время и для врачевания.

Рис. 20. Николай Коперник.

В одной из башен Фромборкского собора Коперник производил астрономические наблюдения. Хотя результаты некоторых из них сохранились, например, определение орбиты Сатурна в 1514 году, о занятиях его аст-

рономией известно мало. Между 1520 и 1530 годами появилось сочинение «Николая Коперника Малый комментарий о гипотезах, относящихся к небесным движениям». В настоящее время известны две рукописи этого сочинения, хранящиеся в Вене и в Стокгольмской обсерватории. В нем в сжатой форме высказана гелиоцентрическая концепция строения Солнечной системы. Имеются данные, что уже в 30-е годы об астрономических взглядах Коперника было известно в Ватикане.

Молодой математик Георг Иоахим (Рэтик) из Виттенбергского университета приехал к Копернику, когда тому было 66 лет, и после изучения в течение двух лет теории Коперника он в 1540 г. выпустил книгу, в которой детально изложена разработанная Коперником доктрина о строении Солнечной системы. В 1542 г. в Виттенберге была издана часть главного труда Коперника, относящаяся к методам использования сферической тригонометрии в астрономии. Наконец, после долгих колебаний, Коперник решает передать в печать свое основное сочинение, в котором полностью изложена новая гелиоцентрическая теория строения планетной системы. Оно вышло в свет в 1543 г., в год смерти Коперника, под названием: «Николая Коперника Торунского об обращениях небесных сфер шесть книг» (рис. 21).

Рис. 21. Титульный лист первого издания труда Коперника «Об обращениях небесных сфер».

Прежде чем начинать знакомиться с гелиоцентрической теорией, разработанной Коперником, следует принять во внимание, что он не смог отойти от дошедшей из древности догмы о равномерности всех круговых движений небесных сфер. В начале книги «Об обращениях...» им сказано: «Невозможно, чтобы первичные небесные тела двигались неравномерно на одном единственном круге, ибо это должно было бы происходить либо в силу непостоянства природы движителя... или по причине неравенств движущегося тела. Но так как наш рассудок противится тому и другому и так как недостойно приписывать нечто подобное тому, кто все устроил по наилучшему порядку, то надлежит признать, что неравномерные движения только представляются нам таковыми». Исходя из этих соображений, Коперник, используя в своей теории кинематическую модель Птолемея, устранил из нее эквант и считал все вращения равномерными. Модель Коперника иллюстрируется рис. 22. Некая планета \mathcal{P} (это может быть и Зем-

Рис. 22. Двойной шарнирный параллелограмм.

ля) обращается вокруг точки \mathcal{T} , в которой, по предположению, находится Солнца. Пусть в двойном шарнирном параллелограмме \mathcal{TRLPQN} сторона \mathcal{TR} неподвижна, первый параллелограмм вращается под действием движителя с угловой скоростью ω , а второй в то же время получает от

этого движителя угловую скорость 2ω в том же направлении. Пусть также

$$TN = RQ = LP = a,$$

а сумма

$$TR + RL = 2ae.$$

При совпадении направления RL с направлением TR точка L совпадает с L_1 , т. е. $RL_1 = RL$, и поэтому длина TL_1 равна длине полного эксцентриситета $2ae$. Разделив ее на четыре равные части, Коперник принял, что

$$TR = \frac{3}{2}ae, \quad RL = \frac{1}{2}ae.$$

При этом предположении возможны три варианта движения точки P относительно T (рис. 23), но все они приводят к одному и тому же ее положению. Коперник предложил схему «эксцентр–эпицикл». Обозначая

Рис. 23. Возможные движения планеты (P) относительно наблюдателя (T).

расстояние планеты от точки TP через r и угол $\angle ATP$ через v , получаем величину $x = M - v$, равную (в современных обозначениях)

$$x = 2e \sin M - e^2 \sin 2M,$$

что совпадает с результатом теории Птолемея, приведенным в лекции IV. Хотя погрешность величины x такая же, как в гипотезе биссекции эксцентриситета, погрешность величины $\frac{r}{a}$ у Коперника оказывается вдвое большей, чем при вычислениях по указанной гипотезе. Однако Коперник находит (книга V), что планеты можно лишь приближенно считать движущимися по окружностям. Этот вывод был совершенно правильным (хотя кажется трудным согласовать его с исходным предположением о равномерном движении небесных тел по окружностям). Истинную форму планетных орбит удалось определить через несколько десятилетий Иоганну Кеплеру.

Видоизменение расчетной схемы Птолемея, связанное с «отбрасыванием» экванта, не повлияло на сущность основного положения Коперника о центральном положении Солнца и вращении вокруг него всех планет, включая Землю.

В отличие от некоторых античных и средневековых ученых, лишь указывавших на относительность движения на примере наблюдений с плывущего корабля, Коперник последовательно применяет принцип кинематической относительности видимых движений небесных тел, но, что самое важное, делает это и для определения действительных движений по данным наблюдений.

Теория Коперника объясняет следующие явления:

1. Суточное вращение небесного свода как отображение вращения Земли вокруг своей оси.
2. Видимое годичное движение Солнца как отображение обращения Земли вокруг Солнца.
3. Прецессионное движение как отображение вращения земной оси вокруг полюсов эклиптики.

Принцип относительности движений сформулирован Коперником очень четко: «Всякое воспринимаемое изменение положения происходит вследствие движения либо наблюдаемого предмета, либо наблюдателя, либо вследствие движения того и другого, если, конечно, они различны между собой».

В труде Коперника «Об обращениях небесных сфер» вначале (книга I) приводится качественное описание всех трех указанных видов движения. Книга II содержит математический аппарат — сферическую тригонометрию и формулы преобразования небесных координат. Движение Солнца и явление предвращения равноденствий рассмотрены в книге III, причем для согласования с неточными наблюдениями Птолемея и арабских астрономов вводится не оправдавшаяся впоследствии гипотеза о неравномерности движения точки весеннего равноденствия. Более совершенной по сравнению с птолемеевой является теория движения Луны, изложенная в книге IV. Центральное место в труде Коперника занимает книга V, где излагается его теория планетных движений и строения Солнечной системы. Теория движений планет по широте, предложенная в книге VI, оказалась, как выяснилось позднее, неверной.

Для расчетов движений небесных тел, и в частности планет, в гелиоцентрической системе важнейшее значение имело то обстоятельство, что математический аппарат, созданный Птолемеем, оказался пригодным. Теория Птолемея не отошла в архив истории, как полагали некоторые популяризаторы науки, недостаточно знакомые с существом дела.

Из первого постулата Птолемея (см. лекцию IV) вытекает, что в моменты соединения с Солнцем долгота планеты и долгота Солнца (определяемые с Земли) одинаковы. Поэтому элементы ε , Π , l , получаемые в предположении, что обращение совершается вокруг Земли, оказываются такими же, как если бы планета обращалась вокруг Солнца. Из того, что периоды обращения нижних планет равны одному году (если считать от неподвижного направления, учитывая равенство $\omega + \sigma = \mu$), можно было бы и ранее прийти к выводу о связи особенностей их движения с движением Земли, но Птолемей этого не сделал. При движении по эпициклу углы, отсчитываемые от неподвижного направления, не рассматривались.

Поскольку наблюдаемые радиусы эпициклов зависят от расстояния, отделяющего Землю от планеты, то можно из наблюдений найти относительные расстояния от планет до Солнца и соответственно распределение планет в Солнечной системе по расстояниям.

В системе «подвижного эксцентра», когда сторона шарнирного параллелограмма \mathcal{TR} (рис. 22) считается вращающейся со скоростью ω , на эпицикле имеется точка, скорость вращения которой равна $\omega + \sigma$, вращающаяся вместе с Солнцем, так как $\omega + \sigma = \mu$. Все такие точки (называемые точками Тихо де Браге) располагаются в направлении от наблюдателя на Солнце, т. е. они совершают свой оборот вокруг точки \mathcal{T} в течение года. Точки Тихо де Браге лежат на одной прямой, и поэтому их положения, подбирая масштабы, можно совместить, например, с положением Солнца.

Отношение $\delta = \frac{b}{a}$ радиуса эпицикла b к радиусу деферента a находится из наблюдений. За единицу масштаба принимается величина a_0 , названная Коперником «радиусом основного круга». При подборе масштабных соотношений множителей k_i так, чтобы выполнялось условие $k_i b_i = a_0$ ($i = 3, 4, 5$), получается значение $\delta_i = \frac{a_0}{k_i a_i}$. Величины $k_i a_i$ представляют собой расстояния планет от Солнца. Поэтому относительные расстояния верхних планет от Солнца равны $\frac{1}{\delta_i} \equiv \bar{a}_i$. Для нижних планет эти расстояния равны $\delta_i \equiv \bar{a}_i$ ($i = 1, 2$). Принимая для Земли значение $\delta = 1$, Коперник получил следующие значения величины \bar{a} для каждой из известных планет:

Планета	\bar{a} по Копернику	Современное значение \bar{a}
Меркурий	0.3762	0.387
Венера	0.7195	0.728
Марс	1.520	1.524
Юпитер	5.217	5.203
Сатурн	9.184	9.139

У Коперника, с использованием новых наблюдений, величины δ_i получались очень близкими к найденным Птолемеом.

Сопоставляя величину \bar{a}_i с периодом обращения планеты, можно найти, что угловая скорость обращения обратно пропорциональна расстоянию планеты от Солнца. Выводы Коперника по «упорядочению» положения планет Солнечной системы и характера их движения имели фундаментальное значение не только для астрономии, но, как выяснилось впоследствии, и для развития механики.

В своем труде Коперник не обсуждал вопросы, связанные со сферой неподвижных звезд и строением Вселенной, ограничься замечанием о том, что «... между крайней планетой Сатурн и сферой неподвижных звезд существует громадное пространство».

Система мира, предложенная Коперником, при ее распространении среди ученых в XVI веке не встретила особенного противодействия со стороны иерархов церкви, хотя они не были согласны с основным положением теории о движении Земли вокруг Солнца. С использованием новой теории в 1551 г. в Виттенберге были составлены т. н. «Прусские таблицы» (эфемериды), гораздо более точные, чем Альфонсовы таблицы. Они также были использованы при проведении в 1582 г. реформы календаря и введении, вместо юлианского, «нового стиля» — григорианского. Он был принят в большинстве европейских стран, но в России «старый стиль» продолжал использоваться до 1918 г.

Многие из ортодоксальных сторонников геоцентрической системы пытались преуменьшить значение труда Коперника, выставляя его систему мира лишь как гипотезу. В первом издании книги «Об обращениях небесных сфер» было помещено анонимное предисловие, в котором утверждалось: «Гипотезы его могут быть и несправедливыми, могут быть даже невероятными; достаточно, если они приводят нас к вычислениям, удовлетворяющим нашим наблюдениям». И далее: «... да не обращается никто к астрономии, если желает узнать что либо достоверное». По мнению автора предисловия, которым был, как выяснилось позже, лютеранский богослов из Виттенберга, «... без божественного откровения они [астрономы] не в состоянии что-либо открывать или что-либо нам передавать». Во втором издании труда предисловие появилось в менее категоричном виде.

По сообщению Рэтика, Коперник долго откладывал публикацию своего труда, чтобы не вызвать споров, понимая, что сломать установившееся веками мировоззрение непросто. В подзаголовке книги Коперником было помещено напутствие: «Да не входит никто, не знающий математики».

В книге Коперника все числа записаны римскими цифрами. В последующие десятилетия математический аппарат сильно усовершенствовался и вычисления значительно облегчились. Формирование сферической тригонометрии завершилось работами Ф. Виета (1540–1603). В 1585 г. впервые вышла в свет книга «Десятичные дроби». В 1614–1618 гг. были составлены первые таблицы логарифмов чисел и логарифмов тригонометрических функций.

Использование гелиоцентрической системы мира сильно упрощало расчеты по составлению астрономических таблиц, но эфемериды получались со значительной погрешностью. Это было связано, с одной стороны, с неполнотой теории, которая не могла учитывать всю сложность движения небесных тел, и, с другой стороны, с недостаточной точностью наблюдений, на которых основывались расчеты. Например, «Прусские таблицы» по истечении двадцати лет давали погрешность в несколько суток при определении моментов соединений планет. От этого особенно страдали астрологи, предсказаниям которых и в XVI веке верили многие люди.

Важнейшая роль в повышении точности наблюдений принадлежит датскому астроному Тихо де Браге (1546–1601). С тринадцати лет он обучался в Копенгагенском университете, а затем в Лейпцигском, куда был послан родными для изучения права, но больше занимался астрономией. Увлеченный еще в юные годы астрологией, Тихо де Браге решил улучшить точность наблюдений планет, чтобы получать более совершенные таблицы их движения.

Погрешность наблюдений посредством угломерных инструментов уменьшается с увеличением размера применяемого инструмента. По заказу Тихо, обладавшего достаточными доходами, и по его проекту был построен большой — радиусом 6 метров — деревянный квадрант, на котором можно было производить отсчет углов с точностью до $10'$.

В 1572 г. Тихо де Браге стал свидетелем явления, впервые отмеченного европейскими астрономами — вспышки Сверхновой, по своей яркости превосходившей Венеру. В попытках определить ее параллакс им было установлено, что он не превышает нескольких минут и, следовательно, расстояние до появившегося светила должно быть больше, чем расстояние до Луны. Появление на небе нового светила противоречило представлениям Аристотеля о неизменности «небесного мира». В 1575 г. Тихо де Браге опубликовал сочинение «О новой звезде», где высказал соображения об образовании ее из «тонкой светлой небесной материи», составляющей Млечный Путь.

Еще сильнее заинтересовавшись астрономией, Тихо де Браге замыслил создание большой обсерватории и, подготавливаясь к этому, посетил обсерваторию в Касселе, построенную и хорошо оборудованную местным ландграфом. При его содействии Тихо де Браге получил от датского короля в ленное владение остров Вен (*Hven*) для постройки там обсерватории, оснащенной самыми совершенными инструментами. Один из инструментов изображен на рис. 24.

Рис. 24. Переносной квадрант Тихо де Браге.

В 1576 году Тихо де Браге стал производить наблюдения в построенном по его плану Ураниборге («Замке Урании»), пригласив в качестве помощников астрономов из разных стран. В дальнейшем была построена еще одна обсерватория Стъернборг («Звездный замок»). Инструменты Ураниборга Тихо де Браге описал в своей книге «Механика обновленной астрономии». Среди них наиболее часто используемым был установленный в меридиане двухметровый квадрант, изготовленный из латуни и жестко прикрепленный к стене. На нем можно было «методом трансверселей» отсчитывать углы с точностью до $10''$ (рис. 25). При наблюдениях использовались часы с секундными стрелками и достаточно точным ходом. Угловое расстояние между небесными телами измерялось посредством секстантов с двумя

Рис. 25. Деление круга для применения «метода трансверселей». Дуга круга в 1° разделена на части, которые, в свою очередь, делятся выгравированными штрихами.

визирами. Радиус большого секстанта составлял 1.7 м, на нем работали одновременно двое наблюдателей. Кроме того, были изготовлены несколько измененные большие армиллярные сферы (диаметром около 3 м). Применение столь совершенных, новых для того времени инструментов сделало возможным уменьшение погрешности измерений по сравнению с лучшими из использовавшихся тогда инструментов в десятки раз — менее $1'$.

Были сильно улучшены таблицы движения Солнца — погрешность их не превосходила $1'$. В XVI веке значительное развитие получила оптика и стало известно явление преломления света и явление рефракции в атмосфере. Тихо де Браге определял рефракцию по наблюдениям Солнца и звезд. Его определения дали следующие результаты:

Высота светил над горизонтом	Рефракция по Тихо де Браге	Истинная величина рефракции
0°	$39'00''$	$34'55''$
5°	$10'00''$	$9'51''$
10°	$5'30''$	$5'19''$
15°	$3'00''$	$3'34''$

Величина рефракции для звезд у Тихо де Браге оказалась меньше, чем для Солнца, так как он исправил наблюдения за счет сильно преувеличенного значения параллакса Солнца ($3'$), принятого согласно данным античных астрономов.

Тщательно изучая в течение двадцати лет движение Луны, Тихо де Браге обнаружил новые неравенства — периодическое изменение наклона ее орбиты к эклиптике, колебания положения линии узлов орбиты и «вариацию», т. е. изменение скорости Луны в зависимости от ее положения на орбите (опережение на расстоянии 45° от сизигий и отставание в октантах). Амплитуда вариации, полученная им, всего на $1'$ отличается от современных ее определений.

Помимо гораздо более точных, по сравнению с найденными ранее, определений движения Солнца и Луны Тихо де Браге непрерывно в течение двадцати лет выполнял наблюдения положений Марса на небе с целью создания точной теории движения планеты. По его мнению, эта теория движения должна была бы служить подтверждением правильности предложенной им системы мира, отличающейся от гелиоцентрической. Отказ от предположения о движении Земли вокруг Солнца был связан с отсутствием наблюдаемого годичного параллакса, что, как считал Тихо де Браге, должно было бы свидетельствовать об огромном расстоянии, отделяющем планеты от звезд, и существовании «большой пустоты». Но это невозможно, так как, по его выражению, «Создатель любит порядок». По-видимому,

физические соображения не были единственной причиной неприятия Тихо де Браге системы Коперника. Он был правоверным католиком, а к концу XVI века не только католическая, но и лютеранская церковь стала резко отрицательно относиться к мысли о движении Земли вокруг Солнца как находящейся в противоречии с основными догмами.

По модели мира Тихо де Браге Солнце, Луна и сфера неподвижных звезд обращаются вокруг Земли, а пять планет обращаются вокруг Солнца. Эта система представляет собой преобразование кинематической модели Птолемея, обусловившее значительное ее упрощение. Расстояния в системе Птолемея приводятся к одному масштабу и число вводимых эпициклов получается меньшим, чем у Птолемея. Количественно характеристики этой системы не были детализированы до такой степени, чтобы, используя ее, можно было вычислять эфемериды. Система Тихо де Браге явилась шагом назад по сравнению с коперниканской.

Значительным вкладом в астрономию оказался составленный Тихо де Браге каталог положений 788 звезд со средней погрешностью приведенных там эклиптических координат звезд около $1'$. Каталог, намного более точный, чем все предшествующие, использовался в течение XVII века и послужил материалом для составления звездного атласа Байера (1608 г.), где впервые самые яркие звезды созвездий получили буквенное обозначение. Из сравнения долгот звезд своего каталога с приведенными в каталогах предыдущего века Тихо де Браге вывел значение постоянной прецессии ($51''$ за год). Кроме того, им было обнаружено изменение широт звезд по сравнению с найденными античными авторами и тем самым установлено, что эклиптика меняет свое положение среди звезд.

Наблюдения комет, проводившиеся в Ураниборге, привели Тихо де Браге к выводу об отсутствии у них видимого параллакса. Из этого он заключил, что кометы располагаются на расстояниях от Земли, больших, чем расстояние до Луны, и поэтому представляют собой небесные тела, а не «сгущения в атмосфере Земли», как полагал Аристотель.

Изменение власти в Дании после смерти покровительствовавшего Тихо де Браге короля пагубно сказалось на деятельности его обсерватории. В частности, были утрачены источники денежных средств, необходимых для работы. В 1597 г. Тихо де Браге покинул Данию и в 1599 г. поселился в Чехии. В окрестности Праги он создал новую обсерваторию и продолжил свои наблюдения. Для обработки наблюдений был приглашен преподаватель математики из Граца И. Кеплер, ставший известным своим сочинением «Космографическая тайна». Этот факт оказался очень важным для дальнейшего развития астрономии. После смерти Тихо де Браге (1601 г.) именно Кеплер стал тем человеком, который смог использовать его богатейшее научное наследие для установления фундаментальных закономерностей в движении планет.

По мере распространения знаний о гелиоцентрической системе мира не только среди ученых, но и в более широких кругах враждебное отношение к ней со стороны церкви усиливалось. Одним из проявлений такого отношения было обвинение инквизицией итальянского мыслителя Джордано Бруно (1548–1600) в том, что он являлся активным сторонником и проповедником коперниканского учения о строении мира.

Характерной чертой Бруно, в 1572 г. ставшего священником, была ненависть к «прогнившей церкви и ее служителям». Сам он был сторонником герметизма — учения, разделявшегося еще античными философами — Платоном и Пифагором. Согласно учению герметиков вся Вселенная божественна, включая человека. Звезды и планеты суть живые существа, обладающие душой. Бруно в одном из своих сочинений писал: «Земля, поскольку она живое существо, движется вокруг Солнца египетской магии; вместе с ней движутся по орбитам планеты, живые светила». Очевидно, насколько подобные взгляды противоречат науке. Бруно был выдающимся мыслителем, но далеким от математики и механики. Не поняв сущности теории Коперника и относясь свысока к методам и результатам астрономии, он принял из нее, по существу, только мысль о том, что Земля не занимает центрального положения в Солнечной системе, и использовал это для возрождения древней философии. Им так была характеризована деятельность Коперника: «Ему мы обязаны освобождением от некоторых ложных предположений общей вульгарной философии, если не сказать, от слепоты. Однако он недалеко от нее ушел, так как, зная математику больше, чем природу, не мог настолько углубиться в последнюю, чтобы уничтожить корни затруднений и ложных принципов». Как видно, по своему тону это высказывание не очень сильно отличается от предисловия к труду Коперника, которое было процитировано выше.

После восьмилетнего заключения в тюрьме инквизиции Бруно был осужден и казнен в Риме в 1600 г. Его осуждение было обусловлено прежде всего выступлениями против монастырей и их доходов, а также его деятельностью по пропаганде в различных странах Европы политических взглядов, противоречащих политике папства. Обвинение в еретических взглядах относительно движения Земли было не главным и даже не фигурировало в ходе судебного процесса. Таким образом, нет оснований считать, что Бруно казнен за свои астрономические воззрения. Вместе с тем обвинение и осуждение Бруно было свидетельством усиления борьбы католической церкви с инакомыслием. Это коснулось и сторонников гелиоцентризма, так как ими отрицался один из важнейших догматов религии. Поэтому процесс Бруно, в котором ему было предъявлено обвинение в коперниканстве, вскоре сказался на судьбе одного из основателей современной науки и одновременно активного пропагандиста гелиоцентрической системы Галилея.

Лекция VIII

Новая астрономия (первая треть XVII века): законы Кеплера, телескопические наблюдения Галилея

Политическая жизнь Европы в конце XVI — начале XVII века характеризовалась многими войнами, которые главным образом были связаны с продолжавшейся реформацией, начатой Лютером и лишившей католическую церковь влияния во многих областях Европы. Выразившее идеологию появившейся буржуазии протестантство встречало ожесточенное сопротивление не только римско-католического духовенства, но и ряда феодальных правителей. В феодальной Европе перекраивались границы, формировались абсолютистские государства. Продолжалась борьба за колониальные владения в Америке и Азии между Испанией, Англией, Францией. В Германии и северных европейских государствах лютеранство занимало сильные позиции, тогда как в Италии, Испании, Франции доминировала католическая церковь. Крайне реакционную роль в ней играли религиозные ордена иезуитов и доминиканцев. Как для католицизма, так и для протестантства характерным было враждебное отношение к новым идеям в науке. В то же время потребности экономики, бурно развивавшихся мануфактур, торговли и мореплавания вынуждали многих светских правителей и влиятельных лиц в королевском окружении не пренебрегать результатами развития науки, постольку, поскольку в явной форме они не противоречили религии.

В такой сложной обстановке протекала деятельность двух крупнейших ученых, основателей нового естествознания — Иоганна Кеплера и Галилео Галилея. До них естествознание состояло в более или менее точном описании явлений природы и, в лучшем случае, систематизации этих явлений в

попытках нахождения возможных связей между ними. Уместно привести высказывание Эйнштейна, относящееся ко времени деятельности Кеплера: «Он жил в эпоху, когда еще не было уверенности в существовании некоторой общей закономерности для всех явлений природы». Настоящая цель науки должна заключаться в познании законов природы и проявлений их в окружающей действительности.

Рис. 26. Иоганн Кеплер.

Иоганн Кеплер (1571–1630) родился на юге Германии (Вюртенберг) в бедной семье. Помимо неблагоприятной обстановки, в которой он рос, в течение всей своей жизни он страдал от тяжелых заболеваний, включая серьезный порок зрения. Только благодаря исключительной силе духа Кеплер в этих условиях смог добиться результатов, поставивших его имя в ряд имен самых выдающихся ученых в истории. Способный ученик духовной семинарии, Кеплер был послан общиной для дальнейшего обучения в Тюбингенский университет. Там он под влиянием известного математика М. Местлина стал ревностным сторонником учения Коперника. Еще до окончания университета в 1594 г. ему пришлось начать работу в качестве учителя математики в Граце. Там он также занимался составлением календарей с астрологическими предсказаниями. В 1596 г. появилось сочинение Кеплера «Космографическая тайна», в котором он предлагал геометрическую (пространственную) модель распределения планет. В правильные многогранники (их существует пять) вписывались сферы и через их вершины также описывались сферы. Радиусы сфер — всего их шесть — оказались близкими к относительным расстояниям шести планет от Солнца, которые были определены Коперником. При всей неправдоподобности (с современной точки зрения) идеи Кеплера о геометрической структуре Солнечной системы его сочинение оказалось полезным для пропаганды гелиоцентрической системы. Вместе с тем, как в этом сочинении, так и в дальнейшей деятельности Кеплера, уверенного «в существовании мудрого промысла божьего», проявлялось стремление найти гармонию в устройстве мира.

Как уже было сказано в предыдущей лекции, Кеплер принял приглашение Тихо де Браге сотрудничать с ним, обрабатывать данные его многолетних наблюдений движений планет. Работать с Тихо де Браге было давним желанием Кеплера, поскольку, по его словам, тот «обладает несметными сокровищами, но не знает, как их употреблять». После смерти Тихо де Браге Кеплеру стоило большого труда получить материалы наблюдений у наследников. В его распоряжении оказался полный каталог значений долготы λ и широты β Марса в моменты его противостояний, полученные за двадцатилетний период. При этом моменты времени фиксировались с точностью до 1^m , а долготы определялись с погрешностью до $5''$.

Для определения эксцентриситета орбиты Кеплером были выбраны значения λ и β для четырех моментов противостояний. Задача решалась в рамках модели Птолемея, т. е. орбита Марса находилась по наблюдениям с Земли. По λ и β определяются направления на Марс с Солнца и из точки экванта. По определению экванта, движение, видимое из этой точки, должно быть равномерным. Кеплер решал задачу об определении эксцентриситета методом последовательных приближений, пробуя различные расположения линии апсид (приближений было более 70), и в результате этой трудоемкой процедуры нашел, что полный эксцентриситет равен 0.18564 долей радиуса орбиты, а Солнце отстоит от центра на расстояние 0.11332. По этим данным вычислялось значение долготы Марса в противостояниях с погрешностью менее $2'$, но для промежуточных положений на орбите расхождение теории с наблюдениями достигало $8'$.

Чтобы найти реальную орбиту Марса в гелиоцентрической системе, Кеплер использовал зависимость между синодическим и сидерическим периодами обращения, которая была установлена Коперником. Сидерический период Марса равен 667^d . Для Земли это соответствует промежутку времени $2T - 43^d.5$, где T — период обращения Земли вокруг Солнца. В этот момент времени положение Марса в пространстве такое же, как в момент $4T - 43^d.5 \times 2$, и т. д. Сопоставляя значение прямого восхождения α , полученное путем решения треугольников SMT , SMT_2 и т. д. (рис. 27), Кеплер нашел, что эксцентриситет орбиты Земли равен 0.01837, а скорость ее движения меняется — в перигелии она движется быстрее, чем в афелии.

Рис. 27. Положение Марса в моменты последовательных противостояний относительно Земли.

Зная эксцентриситет земной орбиты и используя понятие экванта, Кеплер составил таблицы расстояний Марса от Солнца и его долготы. После этого, используя наблюдения Тихо де Браге и по отношению периодов обращения Марса и Земли, Кеплер определил расстояние любой точки орбиты от Солнца, т. е. действительную форму орбиты. Среднее значение радиуса орбиты получилось равным 1.5264 (в долях радиуса орбиты Земли), а расстояние от центра орбиты точки, средней между перигелием и афелием, вдвое меньше величины полного эксцентриситета, равного 0.0926.

Из того факта, что скорость Марса на орбите оказывается зависящей от его расстояния до Солнца, Кеплер вывел заключение о наличии какой-то силы, исходящей от Солнца и управляющей движением планеты. За несколько лет до этого (1600 г.) было открыто притягивающее действие магнита и возникло мнение об универсальности действия магнитной силы. Этого представления не мог избежать и Кеплер, считавший, что вращение «магнитного» Солнца создает в эфире «вихри», которые увлекают за собой планеты. Хотя, как выяснилось впоследствии, такой взгляд не

соответствует действительности, заслуга Кеплера состояла в том, что он впервые связал движение планет с действием на них Солнца. Таким образом за рамки кинематических моделей и обсуждал физическую проблему взаимодействия тел на расстоянии.

Кеплером было получено очень важное выражение, дававшее зависимость между скоростью движения Марса по орбите и его расстоянием от Солнца. Разделив площадь, охватываемую орбитой, на 360 частей и заменив расстояния площадями этих секторов, он сопоставил время $t_2 - t_1$, за которое планета проходит дугу орбиты между положениями, занимаемыми ею в моменты t_1 и t_2 с соответствующей суммой площадей малых секторов, равной полной площади сектора. Из наблюдений следовало, что величина $t_2 - t_1$ пропорциональна площади соответствующего сектора на любом участке орбиты. Это соотношение получило название второго закона Кеплера (закона площадей), который можно сформулировать следующим образом: за равные промежутки времени планета проходит («заметает») равные площади.

В течение долгого времени Кеплер не мог установить, как можно описать действительную форму орбиты, отличавшуюся от круговой — он называл такую орбиту овалом. В решении этого вопроса ему помогло использование известного еще античным математикам соотношения между длинами полуосей эллипса a и b :

$$b = a\sqrt{1 - e^2},$$

которое при малом эксцентриситете e может быть записано в виде

$$b \approx a \left(1 - \frac{1}{2} e^2 \right).$$

Из последнего равенства следует, что сжатие эллипса $\frac{a-b}{a} \approx \frac{1}{2} e^2$. Но как раз такое соотношение существует между наблюдаемым боковым сжатием орбиты Марса и значением ее эксцентриситета:

$$0.00429 = \frac{1}{2}(0.0926)^2.$$

Следовательно, орбита представляет собой эллипс.

Если поместить Солнце в центре орбиты, считая ее эллипсом, то нарушается закон площадей. Поэтому Кеплер продолжал вычисления расстояния точек эллипса от Солнца, помещая его в различные положения, и нашел, что Солнце находится в фокусе эллипса. В дальнейшем (1614–1615 гг.) аналогичный вывод был сделан им для орбит Венеры и Меркурия. Таким образом был установлен первый закон Кеплера: все планеты обращаются по эллипсам вокруг Солнца, которое находится в одном из фокусов эллипса.

Огромная вычислительная работа по определению орбиты Марса была закончена Кеплером к 1604 г. и в это же время были сформулированы первый и второй законы. Полученные результаты были опубликованы им лишь в 1609 г. в книге, имеющей название «Новая астрономия с объяснением причин явлений, или небесная физика». Новизна этого труда определяется, главным образом, методом исследования — из наблюдений небесных тел выведены математически сформулированные законы их движения. Законы Кеплера послужили основой для построения полной теории, показавшей, что они обусловлены фундаментальными свойствами природы. Методы исследования, примененные Кеплером, характерны для всей новой — начавшейся с трудов Ньютона — физики; это прямой путь от эксперимента к математической формулировке закономерностей, проявляющихся в явлениях природы без предвзятых умозрительных концепций.

Занимаясь обработкой наблюдений планет, Кеплер много внимания уделял и другим проблемам астрономии и оптики. В 1604 г. им было опубликовано сочинение, в котором после обсуждения процесса преломления света на границе земной атмосферы были приведены таблицы рефракции, улучшенные по сравнению с ранее составленными Тихо де Браге. Кроме того, Кеплером было установлено, что сила света изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от его источника. В другом сочинении «Диоптрика» (1611 г.) Кеплер описал предлагаемую им новую конструкцию телескопа (который за год до этого был изобретен Галилеем, о чем см. далее). Он предложил вместо использования в телескопе плосковыпуклой и плосковогнутой линз комбинацию двух двояковыпуклых линз, что значительно улучшало оптические свойства системы.

Еще одно сочинение Кеплера было посвящено вспышке Сверхновой, которая наблюдалась им в 1604 г. Он пытался истолковать это явление и даже придавал ему астрологическое значение.

В 1612 г. в связи с изменением политической обстановки в Чехии и осложнением семейных обстоятельств Кеплер переезжает из Праги в г. Линц (Австрия). Будучи в должности учителя математики, он занимался улучшением теории движения Венеры и Меркурия и составлением эфемерид. Они были изданы в 1627 г. под названием «Рудольфовы таблицы» и оказались гораздо более точными, чем ранее составлявшиеся, так как рассчитывались на основе усовершенствованной теории. Этими таблицами пользовались и в XVIII веке.

В качестве итога поисков общего мирового порядка Кеплер написал книгу «Гармония мира» (1620 г.). Среди различных малоубедительных гипотез, подтверждающих, по его мнению, гармоничную структуру мира, им было приведено очень важное для понимания динамики Солнечной системы соотношение между периодами P обращений планет и величинами их

больших полуосей a . Для любых двух планет оно записывается в виде

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}$$

и называется третьим законом Кеплера.

В течение 1618–1621 гг. Кеплером было опубликовано (по частям) большое сочинение «Краткое изложение коперниканской астрономии», в котором содержится в несколько упрощенном виде описание строения солнечной системы, элементы орбит всех планет и теория рефракции. Большое место в этом сочинении отведено попыткам физического объяснения движений планет — «физике неба». По существу, это сочинение является полным изложением современной Кеплеру астрономии, так как в нем говорится о форме и размерах Земли, о звездах, о различных небесных явлениях, о календаре и атмосферных явлениях.

В 1626 г., в связи с преследованием его как еретика, Кеплер покинул Линц и вернулся в Чехию. В это время шла Тридцатилетняя война. Он поступил на службу в качестве астролога к Валленштейну — командующему имперскими войсками короля Чехии Фредерика. В 1630 г. Кеплер умер от болезни.

Теоретические исследования Кеплера, в отличие от составленных им «Рудольфовых таблиц», не привлекли внимания ученых того времени и тем более не произвели впечатления на людей, далеких от науки. Даже Галилей, переписывавшийся с Кеплером еще в ранний период его деятельности (1597 г.), в своем знаменитом «Диалоге о двух основных системах мира» (1632 г.) написал, что формы планетных орбит пока неизвестны — скорее всего, они круговые.

Научная деятельность итальянского физика и математика Галилео Галилея проходила в иных, чем у его современника Кеплера, условиях. В отношении культуры Италия в эпоху Возрождения опережала страны Центральной Европы. Одной из наиболее выдающихся в искусстве и науке областей Северной Италии была Тоскана со столицей во Флоренции. Тосканские герцоги приглашали во Флоренцию самых известных художников, архитекторов, ученых (например, Леонардо да Винчи). Одним из таких ученых был Галилей, которого герцог Козимо Великий (из правящего семейства Медичи) пригласил для службы в качестве «главного математика». Во Флоренции Галилей трудился более тридцати лет. Не будучи профессиональным астрономом, Галилей тем не менее сыграл в развитии астрономии очень важную роль не только пропагандой гелиоцентрической системы мира, но и введением в практику астрономических наблюдений совершенно нового перспективного метода — использования телескопа. Галилей сам изготовил несколько телескопов и с их помощью получил много

новых сведений о природе небесных тел. Метод телескопических наблюдений определил дальнейшее развитие астрономии.

Галилей родился в 1564 г. в Пизе в семье музыканта, бывшего вместе с тем и математиком. Не закончив обучение в Пизанском университете, он продолжил образование в домашних условиях, причем настолько преуспел в освоении наук, что в 1589 г. начал преподавать математику и астрономию в том же университете. С 1592 г. до своего переезда во Флоренцию в 1610 году Галилей был профессором физики и математики Падуанского университета. Еще в Пизе Галилеем были произведены известные опыты по изучению падения тел и сформулирован закон падения тел в поле тяжести. Он ввел в механику понятие об инерции и инерциальной системе отсчета. В круг обязанностей Галилея в Падуанском университете входило преподавание астрономии и он, являясь сторонником гелиоцентрической системы мира, вынужден был учить студентов теории Птолемея, так как этот университет находился под влиянием сторонников концепций Аристотеля.

В 1609 году Галилей узнал об успехах нидерландских мастеров в конструировании оптических систем, позволявших видеть удаленные предметы увеличенными — «как бы вблизи», названных зрительными трубами. В том же году Галилей построил телескоп, содержащий плосковыпуклую и плосковогнутую линзы и дававший тридцатикратное увеличение (рис. 28). Постепенно улучшая качество шлифовки линз, Галилей построил телескоп большего размера с объективом диаметром 5.8 см и фокусным расстоянием 170 см.

Рис. 28. Первый телескоп Галилея.

Начав наблюдения небесных светил с Луны, Галилей обнаружил на ее поверхности горы и оценил их высоту. Затем он отметил различие между тем, как выглядят при наблюдении в телескоп обычные звезды, мерцающие и не увеличивающие размеры, и планеты — «круглые и точно очерченные». При наблюдении Млечного Пути в телескоп оказалось, что он представляет собой скопление огромного количества звезд, в большинстве очень слабых.

Об этих открытиях Галилей сообщил в выпущенном им в марте 1610 г. сочинении «Звездный вестник». Там же было написано о сенсационном обнаружении «четырех планет», обращающихся вокруг Юпитера. Они были названы Галилеем «Медицейскими звездами» в честь герцога Тосканского. Название «спутники» было предложено позднее Кеплером.

Галилей усмотрел в системе Юпитера подобие Солнечной системы. Открытие спутников Юпитера свидетельствовало о том, что Земля не является центром всех круговых движений, а существуют и другие центры обращения. Таким образом, открытие, сделанное Галилеем, лишало сторонников геоцентрической системы их основного довода и указывало на

возможность иного, чем у Птолемея, объяснения видимых движений планет.

Являясь сторонником гелиоцентрической системы, Галилей долгое время отказывался от того, чтобы ее поддерживать открыто. В своем ответе на письмо Кеплера (1597 г.), который считал необходимым более активное распространение учения Коперника, Галилей написал, что для убеждения людей, далеких от науки, в правильности этого учения нужны видимые доказательства. Теперь, получив из своих наблюдений доводы, подтверждавшие правильность гелиоцентрической системы мира, Галилей занял иную позицию и старался широко распространять информацию о сделанных им открытиях.

Качество изображений, получавшихся при наблюдениях на первых изготовленных Галилеем телескопах, было низким и требовались некоторые навыки, чтобы распознать то или иное явление. Поэтому даже во время демонстрации Галилеем спутников Юпитера многие из смотревших в телескоп или не могли их увидеть, или приписывали видимое оптическим эффектам. В некоторых других странах, где стали использовать улучшенные телескопы, эти спутники наблюдались более отчетливо.

В 1611 г. Галилей посетил Рим и был там благосклонно принят многими из представителей церкви. Один из авторитетных астрономов Италии патер Клавий подтвердил существование у Юпитера спутников и даже пытался определить периоды их обращения. Он сообщил кардиналу Беллармини, бывшему главой инквизиции, что и другие открытия Галилея также подтверждаются. Однако эти открытия признавались лишь как факты, а геоцентрическая система мира продолжала считаться церковью единственно правильной. Сам же Галилей полагал, что утверждение гелиоцентрической системы является более важным, чем сделанные им открытия.

Продолжив телескопические наблюдения, Галилей установил, что вид Венеры изменяется со временем подобно изменению фаз Луны. Это явилось неоспоримым свидетельством обращения Венеры вокруг Солнца. Он также обнаружил на Солнце пятна, но почему-то об этом сообщил не сразу, а лишь в 1613 г. В 1611 и 1612 гг. другие наблюдатели также отмечали присутствие пятен на Солнце. Возникший спор о приоритете открытия пятен с наблюдателем Х. Шейнером — иезуитом, стал причиной враждебности к Галилею всего влиятельного Ордена иезуитов.

В 1613 г. Галилей вновь приезжает в Рим и там встречается с кардиналом Барберини (впоследствии, в 1623 г., ставшим папой Урбаном VIII), хорошо образованным человеком, даже написавшим диссертацию о птолемеевой системе мира, и находит в некоторых отношениях поддержку своих взглядов на систему мира. Галилей передает ему свою книгу о пятнах на Солнце. Однако многие из служителей католической церкви, опасаясь того, что мысли об обращении Земли вокруг Солнца посеют в массах сомнения в

догмах Священного Писания и откроют путь к крушению всей идеологической системы, которая ими утверждалась, ожесточенно выступили против Галилея как коперниканца.

Отношения Галилея с инквизицией ухудшились по одной, казалось бы, частной причине. В своей книге «История и доказательство существования солнечных пятен» Галилей полагал пятна принадлежащими Солнцу, приписывая их движение вращению Солнца вокруг своей оси, тогда как Шейнер считал пятна спутниками Солнца. Отрицание Галилеем аристотелевской концепции устройства мира, высказанное в этой книге, еще более обострило уже существовавшую враждебность к нему со стороны церковных ортодоксов.

В связи с доносом в инквизицию монаха Доминиканского ордена, обвинившего Галилея как приверженца учения о том, что «не Земля, а Солнце находится в центре мироздания», в «еретичестве», Святая конгрегация в 1616 г. приняла решение об изъятии из обращения книги Коперника до внесения в нее поправок. Некоторая компромиссность такого решения представляет интерес как свидетельство стремления церкви сохранить свою власть над умами и, вместе с тем, учесть практические потребности общественной жизни.

«Святая конгрегация постановила, что произведение известного астролога Николая Коперника “О обращениях небесных сфер” должно быть полностью осуждено, ибо он излагает взгляды на положение и движение земного шара, противоречащие Священному Писанию . . . Однако поскольку названное произведение содержит много полезных для всеобщего сведения вещей, конгрегация единогласно приняла решение о том, что изданные до сего дня книги Коперника могут быть разрешены . . . если в них будут внесены исправления . . .»

Галилей был предупрежден о том, что учение Коперника нельзя преподавать и его следует рассматривать только как математическую гипотезу.

Так как после этого решения нельзя было прямо защищать гелиоцентризм, Галилею оставалось только обратиться к критике взглядов Аристотеля на строение мира и его представлений о природе. Такая критика содержится в его распространявшемся в списках сочинении «Послание к Инголи» (1624 г.), представлявшем собой ответ богослову, бывшему непримиримым сторонником взглядов Аристотеля. Отмены запрета на книгу Коперника Галилей от папы Урбана VIII не добился. Тем не менее, помня о высказанном им в свое время (когда он еще был кардиналом) мнении, что птолемеевскую и коперниканскую системы мира следовало бы рассматривать наравне, Галилей выпустил в свет сочинение «Диалог о двух основных

системах мира», написанное, чтобы стать доступным многим, на итальянском языке. Книга прошла цензуру инквизиции и была издана с разрешения папы. В ней учение Коперника обсуждалось лишь как гипотеза, и поэтому формально запрет Святой конгрегации не был нарушен. В форме дискуссии между сторонником Аристотеля и коперниканцем, обсуждающими природу небесных тел, суточное и годичное движения Земли, причины приливов и отливов, Галилей демонстрирует преимущество системы Коперника и доказывает, что взгляды Аристотеля и Птолемея на устройство мира противоречат опыту. При этом Галилей использует в качестве аргументов в пользу учения Коперника результаты своих наблюдений Луны, Венеры и Юпитера, а также соображения, следующие из выполненных им опытов по механике. В «Диалоге» предлагается также объяснение морских приливов, которые, как полагал Галилей, вызваны вращением Земли вокруг оси. При этом он крайне недоброжелательно отозвался о книге одного из высокопоставленных иерархов церкви, в которой дано иное объяснение приливов — действием Луны. Оно оказалось правильным, а форма критики ухудшила и без того враждебное отношение к Галилею со стороны многих влиятельных деятелей католической церкви. «Диалог» заканчивался утверждением о недопустимости выбора между системами мира Птолемея и Коперника. Это противоречило содержанию «Диалога», тем более, что сторонник Аристотеля, представленный недалеким человеком, высказывал мысли, близкие к убеждениям папы. Такое не могло не задеть самолюбия Урбана VIII.

В силу ряда обстоятельств, прежде всего политических, после опубликования «Диалога» папа стал относиться к Галилею враждебно. Это было временем конфронтации между Испанией и Германией (в обоих государствах правили Габсбурги) с одной стороны и Францией — с другой. В Италии происходила борьба между сторонниками Габсбургов, поддерживаемыми доминиканцами, и профранцузскими силами — иезуитами. Франция, несмотря на то, что была католической, заключала союзы с протестантскими государствами. Урбан VIII боялся испортить отношения с Испанией и вынужден был лавировать, поскольку до этого вступил в союз с Францией. Он хотел показать себя правоверным католиком, приверженным всем догмам религии. В качестве символической жертвы был избран Галилей, тем более удобной, что в общественном мнении он ассоциировался с Бруно — врагом церкви, осужденным и казненным. Некоторые высказывания Галилея и Бруно в опубликованных ими книгах совпадали (в частности, относящиеся к утверждениям, содержащимся в Библии), и по стилю книги были сходными. Враги Галилея не преминули продемонстрировать это Урбану VIII, который отдал его на суд инквизиции. В результате Галилей был вынужден отречься от своих «заблуждений и ересей», признав, что он всегда верил и будет верить «во все . . . что проповедует и чему учит святая

католическая церковь». До своей кончины (1642 г.) Галилей находился под домашним арестом. Он продолжал заниматься физикой и астрономией, открыв явление либрации Луны. В 1638 году в Лейпциге была опубликована его книга «Беседы и математические доказательства двух новых наук», в которых обсуждались проблемы механики.

В 1635 г. вне пределов Италии появился перевод «Диалога» на латинский язык, а затем вышел и перевод на английский. Из списка запрещенных книг «Диалог» был исключен лишь в 1835 г.

Лекция IX

Прогресс наблюдательной астрономии в середине XVII — начале XVIII века

Ко второй половине XVII века в политической и экономической жизни Европы произошли большие перемены. После успешных войн североевропейских — протестантских — стран в союзе с Францией против империи Габсбургов, включая Германию и Австрию, политическая карта Европы изменилась. Основную роль стали играть Англия и Франция. Вместе с Нидерландами, освободившимися от испанского владычества, они заняли ведущие места в экономическом развитии, которому способствовали колониальные завоевания в Америке и Азии. Германия была разорена и разбита на мелкие государства. После окончания религиозных войн во Франции укрепился абсолютистский режим. Те страны, где господствовавшую роль в идеологии играла католическая церковь — Италия и Испания — постепенно утрачивали свое значение в политической жизни Европы и в экономике, особенно после поражения Испании в войне с Англией. Франция, хотя и оставалась католической, но была гораздо менее ортодоксальной в этом отношении, чем Испания и Италия.

Потребности развивающейся экономики и в особенности промышленности вызывали необходимость в получении новых знаний о природе. Кроме того, в связи с развитием мореплавания усилилась потребность в достаточно точных способах определения долгот. Поэтому значение науки для духовной и материальной культуры увеличивалось, это привело и к совершенствованию организации науки, особенно в Англии и Франции. В условиях централизованного государства создавались общегосударственные научные учреждения, где ученые различных специальностей могли объединить свои усилия для решения задач, ставившихся практикой. При этом деятельность ученых получала государственную и общественную поддержку,

часто в форме субсидий, хотя степень такой поддержки была неодинаковой в разных странах.

Форма создаваемых общегосударственных научных учреждений определялась рядом условий, существовавших в той или иной стране — образом правления, традициями общества и даже географическими факторами. В этом отношении характерно различие форм организации научной деятельности, возникших почти одновременно в двух соседних и соперничавших странах — Англии и Франции.

В Англии — островном государстве, с воспитанным веками отношением к свободе личности, ее инициативе и стремлению к самостоятельности, при конституционном строе в 1645 г. возникло общество сотрудничавших ученых (бывшее вначале тайным). В 1662 г. оно по королевской хартии стало «Королевским обществом». В соответствии с установившейся традицией и требованиями времени это общество ставило своей целью познание природы для использования получаемых знаний на практике. При этом главная роль отводилась эксперименту. Об основах такого подхода к науке было сказано философом Френсисом Бэконом (1561–1626) в его известном произведении «Новый Органон». Согласно Бэкону, наука должна служить практическим целям и исследовать реальную природу. Не при помощи философии, а путем эксперимента люди должны познавать природу. Наблюдения над объектом являются необходимым начальным этапом его изучения. На основе обобщения данных, получаемых из эксперимента, выводятся законы природы. Проверка истинности заключений производится опытом. С таким подходом к науке были солидарны и правившие в Англии круги. Король Карл II выразил свое отношение к науке следующим образом: «Мы покровительствуем философии экспериментального естествознания, входящей во все, что касается торговли и ремесел. . . ». Члены общества не получали жалования и расходовали на эксперименты собственные средства. В этом сказалась особенность Англии, граждане которой обладали большей личной свободой, чем жители многих из континентальных стран.

Подход к научной деятельности во Франции был иным и основывался на положениях, сформулированных философом Рене Декартом (1596–1650). По его мнению, главное условие такой деятельности — свобода мышления, сила разума. Мышление является способом открытия истины и источником знаний. Это положение противоречило принципам исследования, выдвинутому Бэконом. Философия Декарта, названная рационализмом, возникла в условиях абсолютистского правления, при которых личность скована в действиях. Человек может полагаться лишь на свой разум. Декартом был выдвинут принцип «критического сомнения», которое противостоит вере.

Философия рационализма распространилась по многим европейским странам, и под ее влиянием концепции Аристотеля перестали изучаться в университетах. Они заменялись выдвинутой Декартом теорией, согласно

которой круговое движение планет вызывается вихрями «тонкой жидкости», заполняющей Вселенную. Вихри вращаются вокруг Солнца, которое приводит их в движение своим вращением, и передают свое движение планетам, заставляя их также обращаться.

Хотя авторитет Аристотеля во Франции был сильно поколеблен, но в Италии и Испании взгляды Декарта, высказанные им в сочинении «Рассуждение о методе» (1637 г.), были осуждены церковью. В 1663 г. это сочинение было включено в список книг, запрещенных католической церковью.

Во Франции в 1666 году во время правления Людовика XIV его министром финансов Кольбером была создана Академия Наук (называвшаяся также Французским Институтом). Деятельность ее контролировалась правительством. Правилами Французского Института требовалось, чтобы официальные речи и планы кандидатов для избрания «были одобрены правительством до того, как первые будут произнесены, а кандидаты — избраны». Члены Французского Института ежегодно получали от правительства пенсию.

Из сказанного видно, насколько сильно различались научные организации Англии и Франции по характеру их деятельности и роли в общественной жизни. Создание в дальнейшем научных организаций в странах Европы происходило по той или иной модели в зависимости от характера государственной власти в стране.

Для информирования о работе научных обществ стали издаваться — сначала малыми тиражами — научные журналы. В Англии печатный орган Королевского общества был назван “*Philosophycal Transactions*”, а во Франции издавался “*Journal des Savants*” («Журнал ученых»).

При новой форме организации наука становилась более действенной и способной к решению задач, которые были не по силам ученым-одиночкам. Это относилось, в частности, к астрономическим наблюдениям, которые стали выполняться на больших телескопах, требовавших для их постройки и обеспечения работы значительных затрат.

Отмеченные выше обстоятельства — потребность в получении естественнонаучных знаний и совершенствование техники — способствовали быстрому развитию наблюдательной астрономии. Гелиоцентрическая система мира к концу XVII века утвердилась в сознании большинства астрономов. Конструкторы телескопов в 40-е годы стали отдавать предпочтение системе Кеплера, при которой получалось лучшее качество изображения при большом поле. В «соревновании» с телескопическими угломерные инструменты проигрывали. Одним из последних успехов применения «дотелескопических» методов было создание польским астрономом Яном Гевелием (1611–1687) каталога положений 1564 звезд с точностью, превосходящей достигнутую Тихо де Браге — до $10''$. Им была составлена также

подробная карта Луны и присвоены названия различным объектам на ее поверхности. Об этом написано в его сочинении «Селенография» (1647 г.).

В строительстве телескопов больших успехов добился голландский астроном Христиан Гюйгенс (1625–1695). Освоив способы изготовления высококачественных линз, он сооружал телескопы различных размеров — 12-футовый (около 4 м) с объективом диаметром 57 мм, 23-футовый (около 7.5 м) и еще большие — с фокусными расстояниями 45 футов (около 14 м), 60 футов (около 19 м) и 120 футов (около 38 м). Окуляр составлялся из двух плосковыпуклых линз. Наблюдения на очень длиннофокусных телескопах производились в фокусе — сам телескоп (объективная часть) укреплялся на столбе. Главное, о чем заботились конструкторы телескопов, это получение большого увеличения, а качество изображения считалось менее важным. Все же при помощи больших телескопов Гюйгенс смог обнаружить у Сатурна кольцо и открыть спутник планеты.

Помимо строительства телескопов и наблюдений планет, Гюйгенс выполнил ряд исследований в смежных с астрономией областях и в механике. В 1657 г. он изобрел маятниковые часы, в которых были применены способы регулировки периода качаний маятника. Использование таких часов при астрономических наблюдениях оказалось очень полезным, особенно для фиксации моментов прохождения звезд через плоскость меридиана с целью определения прямых восхождений. Пассажный инструмент для таких наблюдений был еще ранее построен О. Рёмером в Копенгагенской обсерватории. При наблюдениях с маятниковыми часами погрешность определения α составила менее 1^s . Гюйгенс пытался приспособить маятниковые часы для использования на кораблях с целью определения долгот, но ход их сильно зависел от качки, и с 1674 г. он стал использовать часы с баланси́ром.

Во время экспедиции, отправленной в 1671 году из только что созданной Парижской обсерватории в Кайенну (близкую к экватору) для определения параллакса Солнца, было обнаружено изменение хода точных маятниковых часов по сравнению с тем, как они шли в Париже. Это было объяснено зависимостью ускорения силы тяжести и, соответственно, периода качаний маятника от широты места. В книге «Маятниковые часы» (1673 г.) Гюйгенс привел вывод формулы, определяющей период P качания маятника:

$$P = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}},$$

где l — длина маятника и g — ускорение свободного падения. При посредстве этой формулы оказалось возможным оценить величину сжатия Земли.

Вращение Земли создает центробежную силу $F_{цб}$. Выражение для этой силы также было получено Гюйгенсом:

$$F_{цб} \propto \frac{v^2}{R},$$

где v — скорость движения точки на поверхности Земли и R — ее расстояние от оси вращения. На экваторе величина этой силы наибольшая и поэтому значение g — наименьшее. Вычисление центробежного ускорения $w_{цб}$ показало, что действием только силы $F_{цб}$ не удастся объяснить наблюдаемое изменение хода часов. Гюйгенс и Ньютон считали, что еще одним фактором, приводящим к уменьшению g , является сплюснутость фигуры Земли вдоль оси вращения.

Для определения фигуры Земли производится измерение длины дуги меридиана в разных его участках с разностью широт 1° . При этом расстояния между двумя точками земной поверхности определяются путем триангуляции — построения сети треугольников и последовательного их решения. Впервые способ триангуляции применялся В. Снеллиусом (Голландия) в 1647 г. Французский астроном Жан Пикар (1620–1682) в 1668–1670 гг. аналогичным путем измерял расстояние по поверхности между точками на севере Франции, у которых, по наблюдениям зенитного расстояния звезд, разность широт составляет 1° . Для наблюдений зенитных расстояний использовался специальный инструмент — телескоп с крестом нитей, что давало возможность очень точно находить направление на звезду, фиксируемое при помощи градуированного сектора круга. Полученная длина дуги в 1° была определена с высокой точностью и оказалась близкой к современному значению. Возможно, что такая точность была делом случая.

Рис. 29. Главный зал Гринвичской обсерватории (с гравюры XVII в.)

В 1675 г. в Гринвиче (близ Лондона) была основана обсерватория, оснащенная самыми совершенными по тому времени инструментами — секстантом в сочетании с двумя телескопами и такого же (7 футов — 2.3 м) размера квадрантом с двумя телескопами и точной шкалой. Первым директором Гринвичской обсерватории («королевским астрономом») был назначен Джон Флемстид (1646–1719), который приобретал инструменты на собственные средства. Основной задачей обсерватории являлось уточнение имевшихся и составление новых таблиц движений небесных тел — в первую очередь Луны — и положений неподвижных звезд. Такие таблицы были необходимы, прежде всего, чтобы «находить долготы мест для усовершенствования искусства навигации». Основным методом определения долгот тогда был «метод лунных расстояний». Кроме того, составлялись таблицы приливов, определялась также высота звезд, Луны, Солнца и планет в

кульминациях. В телескопы обсерватории наблюдать звезды можно было даже днем. Флемстидом и его помощниками были определены положения 3000 звезд, которые расположены в каталоге по возрастающим прямым восхождениям в порядке номеров в созвездии (например, 61 Лебеда). Каталог являлся наиболее точным из существовавших, при его составлении учитывалась рефракция. Вследствие сложных отношений между Флемстидом и Королевским обществом он был опубликован лишь в 1725 г. под названием «Британская история неба».

Помощник Флемстида в Гринвиче Эдмунд Галлей (1656–1742), который впоследствии (в 1720 г.) стал Королевским астрономом, обнаружил небольшое отличие движений Юпитера и Сатурна от рассчитанного по законам Кеплера. Причины этого были выяснены более чем через сто лет П. С. Лапласом. В 1677 г. Галлей пытался определить расстояние от Земли до Солнца из наблюдений прохождения Меркурия по диску Солнца. Однако полученное значение параллакса Солнца оказалось очень неточным. В дальнейшем им было предложено использовать для той же цели наблюдения прохождения Венеры по диску Солнца. При наблюдении из мест с

Рис. 30. К определению параллакса Солнца: путь Венеры по диску Солнца при наблюдениях из двух точек на земной поверхности.

различной широтой пути Венеры по диску не будут одинаковыми (рис. 30), причем $\angle aVb = \angle AVB$. Плоскость орбиты Венеры наклонена к плоскости эклиптики под углом $3^\circ.4$. Смещение по высоте, обусловленное различием положения точек A и B , изменяет длину хорды, по которой происходит видимое движение и соответственно вызывает различие в моментах вступления (и схождения) планеты на диск Солнца. Весь путь Венеры по диску занимает около 7 часов (в случае прохождения вблизи центра). Измерение разности моментов вступления и схождения позволяет в конечном счете найти параллакс Солнца. Так как прохождения Венеры происходят очень редко, то наблюдения этого явления удалось осуществить только в XVIII веке. О них будет сказано в лекции XII.

Упомянутая ранее экспедиция в Кайенну ставила целью нахождение параллакса Солнца путем измерения параллакса Марса, который в конце 1672 г. в момент своего противостояния должен был находиться втрое ближе к Земле, чем Солнце. Одновременные измерения склонения Марса в Париже и Кайенне показали, что параллакс Марса не превосходит $25''$ и соответственно параллакс Солнца не больше $10''$. За более точное значение параллакса была принята величина $9''.5$, что на 15% отличается от современного значения.

Галлей в течение 16 лет производил наблюдения движения Луны. К 1693 г. он установил, что период обращения Луны уменьшается. Важную для дальнейшего развития астрономии роль сыграли наблюдения Галлеем

кометы в 1682 г. Им было обнаружено сходство ее орбиты с рассчитанными орбитами комет, появлявшихся в 1531 и 1607 гг. Галлей высказал мнение, что в эти годы наблюдалась одна и та же очень яркая комета, период обращения которой составляет около 75 лет, и на этом основании предсказал следующее появление кометы в 1759 г.

Сравнивая данные каталога Птолемея о положениях ярких звезд — Арктура, Прокциона и Сириуса — с современными (1718 г.), Галлей обнаружил, что они обладают собственным движением. Среди трудов Галлея следует отметить составление первого каталога положений 341 южной звезды (1679 г.).

Рис. 31. Парижская обсерватория (с гравюры XVII в.).

В 1672 г. была закончена постройка Парижской обсерватории, директором ее стал приехавший из Италии астроном Джованни Кассини (1625–1712) и для работы в ней были приглашены пользовавшиеся известностью Гюйгенс и датский астроном Оле Рёмер (1644–1710).

Благодаря хорошим оптическим свойствам применявшихся в Парижской обсерватории инструментов удавалось фиксировать детали на поверхности планет. Кассини занимался изучением планет еще будучи в Италии и нашел величины периодов вращения деталей на дисках Юпитера и Марса — соответственно 9^h56^m и 24^h37^m (1665–1666 гг.). Продолжая свои наблюдения планет в Парижской обсерватории, он обнаружил неоднородность строения кольца Сатурна, которое оказалось состоящим из нескольких концентрических колец. Наибольший пробел между кольцами получил название «щель Кассини». В 1684 г. Кассини было открыто еще четыре спутника Сатурна.

В Парижской обсерватории Рёмером были выполнены важные не только для астрономии исследования. В 1668 г. Кассини производил расчеты движения спутников Юпитера для определения по их наблюдениям точного времени и, тем самым, нахождения долготы. На основе этих расчетов им были составлены соответствующие эфемериды. При наблюдениях оказалось, что в соединениях Юпитера с Солнцем затмения спутников запаздывали, а при наблюдениях в противостояниях затмения наступали раньше, чем следовало из расчетов. Различие во времени доходило до 22^m . Рёмер объяснил эти факты конечностью скорости распространения света. В противостояниях Юпитер находится ближе к Земле, чем во время соединений с Солнцем, и поэтому свет от спутника доходит до наблюдателя за меньшее время. Зная (приблизительно) относительные расстояния в Солнечной системе и используя найденный по наблюдениям Марса параллакс Солнца, Рёмер получил (1675 г.) для скорости света значение, равное 230 000 км/с.

К предположению Рёмера о конечности скорости света многие, в том числе выдающиеся астрономы отнеслись скептически. В его объяснение видимых неравенств движения спутников Юпитера не верил и обнаруживший эти неравенства Кассини. Лишь в XIX и XX веках было осознано огромное значение вывода о конечности скорости света не только для астрономии, но и для физики. Скорость света представляет собой одну из основных мировых постоянных и входит как важнейшая величина в математическую формулировку законов природы. В астрономии же путь, проходимый светом за год, стал одной из единиц измерения больших расстояний.

В итоге всех описанных выше трудов европейских астрономов к концу XVII века картина строения планетной системы (до Сатурна включительно) в основных чертах выяснилась. Что же касается звездного мира, то здесь долго приходилось ограничиваться лишь более или менее удачными догадками. Следуя Галилею, астрономы полагали, что по размерам звезды подобны Солнцу, а различия в их блеске связывали с неодинаковым расстоянием от Земли. Одна из первых попыток оценки расстояния до звезд была предпринята Гюйгенсом. Он изобрел способ сравнения блеска ярчайшей звезды Сириуса с блеском Солнца. Считая, что количества света, излучаемые обоими этими телами, одинаковы, и учитывая выведенный Кеплером закон об изменении силы света обратно пропорционально квадрату расстояния от источника, Гюйгенс нашел, что расстояние от Земли до Сириуса в 30 000 раз больше, чем до Солнца. Оценка Гюйгенса превосходила предыдущие оценки расстояний до звезд, проведенные Галилеем (по принятой им верхней границе диаметров звезд $D < 5''$) в сотни раз. Этот результат опубликован Гюйгенсом в его сочинении «Космотеорос» (1698 г.), где он также высказывает свое мнение о многочисленности обитаемых миров. Гюйгенс являлся сторонником концепции Декарта о вихревом движении заполняющей пространство «тонкой материи». Свет он трактовал как волновое движение в такой среде, и поэтому говорил (1678 г.) о конечности скорости света (возможно, что эта теория была разработана Гюйгенсом в связи с результатом, полученным Рёмером). Опубликована теория была лишь в 1690 г. в его сочинении «Трактат о свете».

В заключение заметим, что на небе еще астрономами античности были обнаружены объекты, по виду отличающиеся от остальных звезд, названные «туманными звездами». Гевелий насчитал 16 таких объектов, Галлей описал 6 из них. Однако в XVII веке никаких научных выводов об их природе сделано не было.

Лекция X

Открытие фундаментального свойства природы — всемирного тяготения

Во второй половине XVII века естественнонаучные исследования в Англии и Франции сосредоточились, главным образом, в новых «академических» центрах — Королевском обществе и Французском Институте. Крупные университеты — Оксфордский, Кембриджский, Парижский и другие в этом отношении отошли на второй план. Сильное влияние схоластики на их деятельность привело к тому, что там мало интересовались изучением природы. Конечно, значение университетов для образования и создания духовной культуры сохранялось. Студенты имели возможность по книгам и лекциям прогрессивных профессоров знакомиться с новыми идеями, обладая вместе с тем знанием культуры античности, включая древние языки и историю.

Студентом Тринити-колледжа (колледжа Святой Троицы), который был образован в составе Кембриджского университета при Генрихе VIII (1546 г.), стал в 1661 г. будущий великий ученый Исаак Ньютон, труды которого в большой степени определили развитие математики, механики, физики и астрономии в последующие три столетия. Огромное значение для этих наук имело открытие Ньютоном всеобщего свойства природы — всемирного тяготения.

Мысли о существовании тяготения, под действием которого материальные (физические) тела притягиваются друг к другу, высказывались и до Ньютона. Тяготение как фактор, вызывающий приливы, обсуждалось во времена Галилея и Кеплера. Галилей ввел понятие движения по инерции, уточненное его учениками Б. Кавальери (1632 г.) и Э. Торичелли (1644 г.).

Скорость и направление движения тела могут меняться только под действием внешней силы. Сочетание с принципом инерции понятия центробежной силы (Гюйгенс, 1659 г.) приводит к выводу, что на планеты, обращающиеся вокруг Солнца, должна действовать сила, уравнивающая центробежную. Она направлена к Солнцу и должна быть обусловлена его притяжением. Направление силы к центру окружности, по которой происходит движение, послужило причиной названия «центростремительная». Аналогичная центростремительная сила должна действовать со стороны Юпитера на его спутники (Д. Борелли, 1665 г.). Куратор Королевского общества Р. Гук высказывал идею об уравнивании центробежной и центростремительной сил и при движении тела по эллиптической орбите (1666 г.), но не смог дать математического описания движения. Таким образом, почва для открытия закона тяготения была подготовлена. Вместе с тем потребовалось очень глубокое обобщение данных наблюдений на Земле и в небе, интуиция и огромный математический дар, чтобы сформулировать закон всемирного тяготения и доказать его универсальность. Этими качествами обладал Ньютон, которому и принадлежит заслуга открытия закона, хотя, по его собственному выражению, он «стоял на плечах гигантов».

Рис. 32. Исаак Ньютон (портрет 1706 г.).

Ньютон родился в 1643 г. в семье фермера. Сначала он обучался в деревенской школе, а затем в королевской школе (Грентем, графство Ланкашир). Не имея склонности к занятиям фермерством, Ньютон после окончания школы по совету дяди-пастора поступил в Кембриджский университет. В нем он изучал арифметику, геометрию (по Евклиду), аналитическую геометрию (по Декарту) и астрономию по Копернику.

В университете Ньютон также занимался опытами по оптике и углубленно исследовал явление дисперсии света. Тщательное изучение им математики и оптики было стимулировано известным ученым И. Барроу, с 1643 г. руководившим Тринити-колледжем.

В 1665 г. Ньютон закончил университет, но в это время в Англии началась эпидемия чумы, заставившая его уехать в деревню. Находясь там в 1666–1667 гг., Ньютон размышлял о свойствах силы тяготения, заставляющей планеты обращаться вокруг Солнца. Для того, чтобы определить, как эта сила меняется с расстоянием до Солнца, он воспользовался третьим законом Кеплера. При движении по окружности радиуса a скорость v связана с периодом P соотношением

$$v = \frac{2\pi a}{P},$$

и из закона Кеплера получается следующая зависимость центробежной, а значит, и центростремительной силы от расстояния до Солнца:

$$F \propto a^{-2}.$$

Подобная форма зависимости силы от расстояния была известна до Ньютона. Ньютон сделал предположение о том, что ускорение свободного падения тела на поверхность Земли, равное g , вызываемое ее притяжением, и центростремительное ускорение Луны на орбите, обусловленное притяжением ее к Земле, имеют ту же природу, что и ускорение, создаваемое тяготением Солнца. Поэтому зависимость ускорения от расстояния до притягивающего тела должна быть такой же, какая получена для Солнца. Отсюда следует, что на расстоянии Луны от центра Земли $r_{\text{С}}$ центростремительное ускорение должно быть равным $g \left(\frac{R_{\oplus}}{r_{\text{С}}}\right)^2$. Вместе с тем, для величины центробежного ускорения на расстоянии $r_{\text{С}}$ получается величина $\frac{(2\pi r_{\text{С}})^2}{P_{\text{С}}^2 r_{\text{С}}} = \frac{4\pi^2}{P_{\text{С}}^2}$. Равенство центробежного и центростремительного ускорений приводит к соотношению

$$g = \frac{4\pi^2}{P_{\text{С}}^2} \left(\frac{R_{\oplus}}{r_{\text{С}}}\right).$$

Ньютон, приняв известное из имевшегося при нем старого учебника астрономии значение $r_{\text{С}}$, нашел, что вычисляемое по этому соотношению значение g отличается от наблюдаемого на 12%, и воздержался от публикации своих выводов.

Другой проблемой, которой занимался Ньютон во время вынужденного пребывания в деревне, была разработка «метода флюксий», т. е. по существу основ дифференциального и интегрального исчислений.

После возвращения в 1667 г. в Кембриджский университет Ньютон посвящал себя преимущественно решению проблем оптики. В 1663 г. Я. Грегори высказал идею о создании телескопа, собирающего лучи от источника с помощью вогнутого зеркала, но им эта идея не была реализована. Первый в мире телескоп-рефлектор с параболическим зеркалом и плоским зеркалом в фокусе был создан Ньютоном. В 1671 г. им построен второй подоб-

Рис. 33. Телескоп Ньютона.

ный телескоп. Вскоре после этого Ньютона избрали в члены Королевского общества.

С 1669 г., став профессором математики, Ньютон продолжал изучение проблем, связанных с явлением дисперсии света.

Задачей о движении тел под действием тяготения занимался также Гук, но он не сумел точно определить форму орбит. Под влиянием своего друга

астронома Галлея Ньютон, критически относившийся к работам Гука о тяготении, вернулся к проблемам механики (1680–1682 гг.). Упорно работая над решением задачи о форме орбиты тела, движущегося под действием центральной силы, обратно пропорциональной квадрату расстояния, Ньютон подготовил большое сочинение, названное им «Математические начала натуральной философии» (под выражением «натуральная философия» в то время подразумевалось естествознание). Этим трудом были заложены основания современной физики.

Рис. 34. Титульный лист первого издания труда Ньютона «Математические начала натуральной философии».

Во введении к «Началам» Ньютоном говорится о «рациональной механике», задача которой «по наблюдаемым явлениям определить силы природы и после этого изучить прочие явления». Затем предлагаются определения механических величин — массы, силы, количества движения; формулируются три закона механики, названные аксиомами.

В книге I, после изложения новых понятий, относящихся к математическому анализу, выводится закон площадей (второй закон Кеплера) для движения материальной точки под действием центральной силы. В этом выводе использован метод флюксий, т. е. выполнено интегрирование (в геометрической форме). После этого приведено доказательство того, что движение тела происходит по коническому сечению, если действующая сила исходит от тела, находящегося в фокусе кривой и изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния движущегося тела от фокуса. Этот вывод и следствия из него стали важнейшими для астрономии и создания теории движения небесных тел — небесной механики.

Таким образом Ньютоном, показавшим ранее (1667 г.), что сила тяготения, исходящая от Солнца, изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния от Солнца, была объяснена эллиптическая форма планетных орбит. Доказательство основывалось на известных из геометрии свойствах эллипса.

Кеплер в своих рассуждениях о причинах движения планет вокруг Солнца близко подошел к тем выводам, которые сделал Ньютон, но не дал универсальной формулировки закона. Идея тяготения им лишь иллюстрировалась на примере «двух камней».

Луна под действием тяготения Земли также движется по эллипсу. Для системы Земля–Луна, как и для системы Солнце–планеты, предположение о том, что все тела можно считать точечными массами, является хорошим приближением. Однако совершенно не очевидно, что рассматривая взаимодействие Земли с телом, находящимся близко к ее поверхности, допустимо считать, что ее можно заменить точечной массой. Ньютон строго доказал, что рассматривая притяжение любого тела эллипсоидом враще-

ния, допустимо принимать всю массу эллипсоида сосредоточенной в его центре. Тем самым понятие о тяготении получило необходимое подтверждение, поскольку был теоретически обоснован вывод о природе ускорения силы тяжести на поверхности Земли. Ньютон в книге III «Начал» (носящей название «Система мира») смог предложить универсальный закон всемирного тяготения для любых масс \mathcal{M}_1 и \mathcal{M}_2 , используя сформулированные им законы механики:

Сила тяготения F пропорциональна произведению масс и обратно пропорциональна квадрату расстояния r между ними:

$$F = G \frac{\mathcal{M}_1 \mathcal{M}_2}{r^2}.$$

Постоянная тяготения (гравитационная постоянная) G должна быть определена экспериментальным путем. Называя этот закон законом всемирного тяготения, Ньютон не считал, что весь мир заключен в пределах Солнечной системы.

В книге I Ньютон рассмотрел задачу трех тел и ввел понятие возмущенного движения, а в книге III дал приближенное ее решение для объяснения неравенств в движении Луны¹. Теория Луны, предложенная Ньютоном, не могла отразить все особенности ее движения из-за недостаточности сделанных приближений, но основные — движение линии узлов и изменение угла наклона лунной орбиты к эклиптике — были Ньютоном объяснены, хотя численного согласия с наблюдениями достичь не удалось.

II книга «Начал» содержит решения ряда механических и гидродинамических проблем, в частности, задачи о движении в среде с сопротивлением, теорию гидравлического маятника, решение задачи о скорости распространения волн в жидкости и определении скорости звука. Изложены основы «метода флюксий», т. е., по существу дифференциального исчисления.

Важнейшие астрономические приложения выводов о движении тел под действием тяготения рассмотрены Ньютоном в книге III «Начал». Во введении им приведены следующие «общие правила философии», т. е. научного исследования:

1. Достаточность причин.
2. Одинаковость причин для сходных явлений.
3. Свойства тел постигаются не иначе чем испытаниями.

¹В астрономии под выражением «неравенство движения» подразумевается отклонение наблюдаемого движения от рассчитанного.

Свойства тел только те, которые при опытах обнаруживаются и не могут быть устранены. Такова инерция: «Под врожденной силой я разумею, единственно, только силу инерции».

Ряд выводов относится к теории движения комет под действием тяготения Солнца. Рассмотрено параболическое движение и найдено значение параболической скорости. Предложен способ определения орбиты по трем наблюдениям геометрическим путем. Наблюдаемое движение комет является подтверждением закона всемирного тяготения — они движутся по очень сильно вытянутым эллипсам, также возможно движение по параболам.

Ньютон предложил теорию фигуры Земли, используя вычисление притяжения материальной точки однородным эллипсоидом («сплошным»). Предполагая, что жидкая масса, вращаясь, приняла форму эллипсоида, и вычислив отношение центробежной силы на экваторе к силе притяжения там же, Ньютон получил для сжатия величину $\varepsilon = \frac{1}{230}$. При этом он использовал измерение окружности Земли Ж. Пикаром и определение ускорения силы тяжести g в Парижской обсерватории. Ньютон нашел также зависимость величины g от широты места наблюдения, подтвержденную измерениями частоты колебаний маятника в Кайенне и в Париже, о которых говорилось ранее (лекция VIII).

В книге I «Начал» Ньютон дал качественную теорию приливов на основе приближенного решения задачи трех тел — частицы жидкости, Солнца и Земли. Предполагалось, что поверхность жидкости принимает форму эллипсоида вращения, определяемого мгновенным состоянием поля возмущающих сил («статические приливы»), полярная ось этого эллипсоида направлена к возмущающему светилу. В книге III определение приливного эллипсоида сведено к задаче о нахождении фигуры Земли. Суточное вращение и движение Солнца приводит к перемещению эллипсоида для наблюдателя на Земле. Аналогичный эллипсоид создается действием Луны и также перемещается. Ньютон находит эффект совместного перемещения солнечного и лунного эллипсоидов, т. е. движение приливной волны по поверхности Земли. Массу Луны Ньютон оценил по наблюдаемому соотношению высоты квадратурных и сизигийных приливов, равному 9 : 5. Оценив плотность Земли с довольно хорошей точностью, считая плотность Солнца вчетверо меньше, чем у Земли, и зная диаметр Солнца, по вариации высоты приливов Ньютон нашел отношение масс Луны и Земли равным $\approx \frac{1}{40}$. Различие с истинным значением этого отношения в два раза объясняется предположением об однородности жидкой Земли.

Оценка масс планет Ньютоном была сделана по наблюдениям движения их спутников, которое соответствует, как и движение планет, законам Кеплера. Ньютон внес большой вклад в теорию рефракции, впервые учтя неоднородность земной атмосферы, а также приняв во внимание измене-

ние показателя преломления в зависимости от плотности воздуха, показав, что она убывает с высотой по экспоненциальному закону. Таким образом, Ньютон явился основоположником теории строения атмосферы Земли. Сохранились две таблицы рефракции, составленные Ньютоном (в 1694 и 1695 гг.).

Открытие Ньютоном фундаментального свойства природы — тяготения — стало началом современной физики и основой небесной механики. По пути Ньютона в течение последующих лет пошло множество выдающихся ученых. Сам Ньютон после издания «Начал» занимался в основном оптикой и только временами возобновлял работу над теорией Луны. Однако его и в дальнейшем занимали две проблемы — природа света и действие на расстоянии. Обе они связаны с вопросом о существовании гипотетической среды, называемой эфиром. Эта среда предполагалась как фактор, обеспечивающий взаимодействие не соприкасающихся друг с другом тел, а колебания эфира рассматривались Гюйгенсом, как способ распространения света.

В качестве альтернативы гипотезе Гюйгенса Ньютоном была выдвинута корпускулярная теория света. Кроме того, Ньютон был противником концепции Декарта об эфирных вихрях как причине, вызывающей видимые движения небесных тел. Тем не менее, от гипотезы существования эфира Ньютон не отказывался, но в конце своей деятельности он перестал высказывать какую-либо определенную точку зрения на проблему реальности эфира. В этом он следовал своему убеждению в том, что должны изучаться величины и математические соотношения между ними, выводимые из опыта и проверяемые экспериментально. Философские споры о природе им отвергаются, он заявляет в «Началах»: «Гипотезам нет места в экспериментальной философии». Столь категоричное заявление, по существу, противоречит методу исследований, который им пропагандируется. Отказаться от выдвижения гипотез невозможно, так как постановка опыта сама по себе предполагает наличие некоторой гипотезы, которая проверяется.

Использованные Ньютоном понятия абсолютного пространства и абсолютного времени, детерминированности процессов, характерные для той эпохи, в XX веке должны были уступить место иным представлениям, о чем будет рассказано в следующих лекциях.

До трудов Ньютона практически все ученые и философы не признавали возможности дальнего действия — взаимодействия тел на расстоянии без посредства конкретного материального фактора. Поскольку Ньютоном динамическое действие эфирных вихрей отрицалось, то физика гравитационного взаимодействия в то время им не могла быть объяснена. Будучи глубоко религиозным человеком, Ньютон считал всю природу созданием Бога, который привел мир — и как часть его Солнечную систему — в наблюдаемое состояние. Мир уподобляется «заведенным часам», хотя и допустим «сбой

часов» в результате возмущений движения небесных тел, связанных с действием закона всемирного тяготения. За эти взгляды Ньютон подвергался критике со стороны ортодоксальных представителей церкви.

Более чем тридцать лет жизни Ньютон посвятил общественной деятельности. В 1696 г. он был назначен директором Монетного двора и очень много сделал для упорядочения финансовой системы Англии. В 1703 г., после смерти Гука, Ньютон стал президентом Королевского общества.

Второе издание «Начал» вышло в свет в 1713 г. К тому времени основные результаты теории движения небесных тел под действием силы их взаимного притяжения не оспаривались — и в Англии эта теория уже преподавалась в университетах. По иному сложилось отношение к трудам Ньютона на континенте — во Франции и Германии. Закон всемирного тяготения не был принят крупными учеными Лейбницем и Гюйгенсом. В работах французских ученых в течение десятков лет после выдвижения этого закона продолжала доминировать «вихревая» теория Декарта. В распространении «ньютонианства» известную роль сыграли «Письма из Лондона» (1728–1730 гг.), в которых Вольтером сообщалось о законе всемирного тяготения и следствиях из него, а также изданная в 1733 г. книга Вольтера «Элементы философии Ньютона», содержащая изложение в упрощенной форме ньютоновской теории света и теории тяготения. Неприятие взглядов Ньютона во Франции было в значительной мере связано с соперничеством Франции и Англии в политике и экономике. Кроме того, французским ученым был чужд эмпирический подход к решению проблем естествознания, характерный для английской науки.

В отличие от концепций Декарта, не дававших способов расчетов движения небесных тел, по ньютоновской теории можно было производить вычисления, объяснять и предсказывать особенности движения небесных тел, до тех пор не находившие объяснения, как, например, формы кометных орбит. Это обстоятельство оказалось решающим для принятия теории Ньютона, и к 40-м годам XVIII века «теория вихрей» перестала рассматриваться в качестве научной. Французские ученые XVIII и XIX веков, среди которых было много выдающихся математиков, занимаясь решением сложных задач, возникавших при исследовании возмущенного движения небесных тел, внесли огромный вклад в небесную механику. Вместе с тем решение этих задач в значительной мере способствовало развитию математики.

Открытие Петром I «окна в Европу» совпало по времени с распространением новой, «постньютонианской» физики и астрономии в европейских странах. Благодаря этому российская астрономия сравнительно быстро достигла европейского уровня. В допетровской России астрономия как наука не существовала, так как церковь всячески препятствовала распространению знаний о гелиоцентрической системе мира, проникавших теми или

иными путями из-за границы. Уже в 90-х годах XVII века в Москве на Сухаревой башне действовала обсерватория Я. Брюса. Там составлялись календари, в которых сообщалось о времени восходов и заходов Солнца и Луны и о различных небесных явлениях. Об отношении к деятельности Брюса в широких массах можно судить по данному ему прозвищу «чернокнижник». Под Архангельском, через который проводилась торговля с Англией и где была возможность приобрести подзорные трубы, некоторыми просвещенными людьми производились астрономические наблюдения и даже была предпринята попытка устройства обсерватории.

Петр I познакомился с началами астрономии еще юношей по книгам, имевшимся в библиотеке его отца. Понимая необходимость использования астрономии в навигации и для составления географических карт, он, будучи в 1717 г. в Париже, пригласил известного французского астронома Ж. Делиля в Россию для организации обсерватории. При содействии Делиля для будущей обсерватории были закуплены инструменты и книги.

Жозеф Делиль (1688–1768) учился у Кассини. С 1710 г. он производил наблюдения в собственной обсерватории, в 1714 году стал членом Французского Института, а с 1718 г. — профессором в одном из самых престижных учебных заведений «Коллеж де Франс». Делиль был убежденным ньютономцем, и ему приходилось вести тяжелую борьбу со сторонниками концепций Декарта. Согласившись на предложение Петра I приехать в Россию, он отложил свой приезд до окончания проводившихся им наблюдательных работ. К предстоящему переезду в Россию он тщательно готовился, и в 1724 г., при посещении Англии, встречался с Ньютоном и Галлеем (бывшим тогда Королевским астрономом) для обсуждения программы развития астрономии в России. Делиль приехал в Петербург в 1725 г. Это был год открытия Академии наук, основанной по указу Петра I в 1724 г.

Программа, составленная Делилем, содержала следующий перечень подлежащих решению основных задач:

1. Градусные измерения вдоль Петербургского меридиана.
2. Определение астропунктов.
3. Основание в Петербурге обсерватории.
4. Нахождение расстояний до Солнца, Луны и планет. Теория движения планет.
5. Исследование рефракции.
6. Подготовка специалистов-астрономов.
7. Составление трактатов по астрономии.

Ж. Делиль проработал в России в течение 22 лет. Он начал с разъяснения работ Кеплера и Ньютона, однако прежде всего пришлось доказывать на диспутах правильность гелиоцентризма. В этом его поддерживал один из прогрессивных деятелей петровской эпохи вице-президент Синода Феофан Прокопович, защитивший Делиля от нападок со стороны приверженцев геоцентризма.

Строительство обсерватории в Петербурге — на здании Академии наук — было закончено в 1727 г. Приглашенные с Запада ученые стали производить в ней астрономические и метеорологические наблюдения. Среди них находился Леонард Эйлер (1707–1773), ставший одним из крупнейших ученых XVIII века. Приехавший в Петербург вместе со своим учителем Даниилом Бернулли, работавшим по приглашению в Академии наук, Эйлер в 1733–1741 гг. был профессором математики в Академии.

Обсерватория оборудовалась современными инструментами, среди которых были 7-футовый (2.3 м) телескоп системы Ньютона, астрономические часы, пассажный инструмент, универсальные инструменты. На них выполнялись наблюдения Солнца, Луны, планет и их спутников, затмения и покрытия звезд Луной. В обсерватории составлялись эфемериды и каталоги звезд. Был разработан метод определения географических долгот по наблюдениям Луны в кульминациях. В 1740 г. организованной в Березов экспедицией при произведенных по этому методу наблюдениях долготы была достигнута очень высокая точность — погрешность долготы не превысила $3^{\text{s}}.5$. Обсерватория организовывала картографирование местности. Значительное место в деятельности Петербургской обсерватории занимали наблюдения Солнца физического плана — изучение движения пятен, вращения Солнца, измерение его диаметра. Проводились также расчеты движения комет.

В 40-х годах политическая обстановка в России изменилась и положение дел в Академии наук ухудшилось. Возросло влияние Шумахера, преследовавшего прогрессивных ученых. В 1747 г. Делилю пришлось покинуть Россию, причем он даже был лишен пенсии. В том же году обсерватория сгорела вместе с инструментами. В силу этих обстоятельств астрономическая деятельность в России сильно сократилась. Все же в 1761–1769 гг. российские астрономы приняли участие в наблюдениях прохождения Венеры по диску Солнца по программе, разработанной еще Делилем. В 1768 г. А. И. Лекселем наблюдалась комета с коротким периодом, орбита которой, как было показано им, оказалась эллипсом с не очень большим эксцентриситетом.

Лекция XI

Позиционная астрономия и небесная механика в XVIII веке

Потребности экономики обусловили прогресс науки в европейских странах, прежде всего в тех областях, где результаты исследований могли быть непосредственно использованы в производстве. Создание машин и механизмов, облегчающих труд и увеличивающих его производительность, стало во второй половине XVIII века одной из главных целей, ставившихся перед научными организациями и отдельными учеными. Большую роль в достижении этих целей играла добившаяся наибольших успехов по сравнению с другими областями знания механика. Иногда XVIII век называли «веком механики».

Роль механики в естествознании многими из ученых преувеличивалась. Они полагали, что на основе законов механики можно объяснить все явления природы. Такие представления укрепились после того, как на основе закона всемирного тяготения удалось объяснить очень многие из наблюдавшихся на небе явлений. Новая наука — небесная механика — продемонстрировала могущество этого универсального закона. Гравитационное взаимодействие небесных тел усложняет их видимые движения настолько, что для их расчета с целью составления эфемерид и предсказания различных явлений необходимо усовершенствование математического аппарата. Поэтому небесная механика стала областью, в которой объединились усилия математиков и астрономов. Это относилось в большей степени к Франции, чем к Англии, где продолжали преобладать исследования с эмпирическим уклоном, результаты которых можно использовать для практических целей.

В Гринвичской обсерватории, как и в Парижской, продолжались традиционные наблюдения, составление каталогов звезд, изучение движений

планет, особенностей движения Луны. Особое внимание уделялось повышению точности наблюдений путем совершенствования инструментов. В XVIII веке в телескопостроении произошли значительные изменения. У линзовых телескопов был крупный недостаток — хроматическая аберрация. Тем не менее преимущественно они использовались до 20 – 30-х годов XVIII века. В эти годы была разработана техника шлифовки больших зеркал и стало возможным изготавливать достаточно большие рефлекторы системы Ньютона. Рефлекторы давали изображения высокого качества при большом поле зрения, что позволяло различать детали на поверхности светила. Все же такие телескопы было трудно сопрячь с угломерными инструментами, и поэтому в обсерваториях продолжали употреблять длиннофокусные рефракторы.

Хотя Ньютон пришел к скептическому выводу о возможности устранения хроматической аберрации, Джону Доллонду в 1757 г. удалось создать сложный объектив, лишенный этого недостатка. Между двумя двояковыпуклыми линзами, изготовленными из кронгласа, помещалась двояковогнутая линза из флинтгласа. Поскольку показатель преломления у кронгласа обычный, а флинтглас сильно преломляет свет, то эффект хроматической аберрации в таком объективе компенсируется. Телескопы с ахроматическими объективами обладали большим полем зрения при резком изображении, они были особенно удобны для наблюдений слабых звезд — фиксации моментов прохождения изображения звезды через сетку нитей — и широко распространились.

В бытность Галлея Королевским астрономом Гринвичская обсерватория была оборудована за счет государства совершенными инструментами. В частности, деление градуированных кругов было выполнено с очень высокой точностью. Инструмент, установленный в Гринвиче, позволял фиксировать моменты прохождения звезды через нить с точностью $0^s.1$. Такая точность не достигалась за всю предшествующую историю астрономических наблюдений.

Совершенствовались также инструменты, используемые при навигации для наблюдений с пlyingщего корабля. Предложение об одновременном наблюдении двух источников света — каждого через свою половину объектива инструмента, высказанное еще Ньютоном, было реализовано лишь в 1731 г., когда был изготовлен «зеркальный квадрант», впоследствии (с 1757 г.) замененный зеркальным секстантом. Он употреблялся для определения высоты светила над горизонтом при наблюдении с корабля.

В 1701 г. Ньютоном было выдвинуто предложение об установлении премии за наилучший способ определения географической долготы. В 1714 г. соответствующий закон был принят парламентом и для рассмотрения проектов учрежден «Совет по долготе». В конечном счете в 1773 г. премия была присуждена Джону Гаррисону за изготовление часов, в которых сделано

устройство для компенсации температурных влияний на работу механизма. Долгота определяется путем сравнения показаний хронометра, идущего по времени на Гринвичском (или другом, с известной долготой) меридиане с местным временем. Метод нахождения долгот по показаниям хронометров получил широкое распространение и применялся вплоть до XX века. Вместе с тем наградой были отмечены труды Эйлера и германского астронома Тобиаса Майера по составлению таблиц движения Луны.

Со времени Коперника и Тихо де Браге поиски годичного параллакса для определения по нему расстояний до звезд оставались одной из важнейших наблюдательных задач. В 1725 г. был сконструирован инструмент для точных наблюдений склонений звезд, кульминирующих вблизи зенита. Сектор точно разделенного круга радиусом 24 фута (около 8 м), скрепленного с телескопом, устанавливался в меридиане, и склонение звезды определялось с погрешностью не более $2''$. Молодой профессор астрономии Оксфордского университета Джеймс Брайдлей (1693–1762), производя наблюдения посредством этого инструмента, обнаружил у звезды γ Дра изменения склонения с периодом, равным одному году, и амплитудой $40''$. При наблюдениях в пределах 6° от зенита (с более широким сектором) он нашел аналогичное смещение и у других звезд, причем амплитуда была тем меньше, чем ближе звезда находится к эклиптике. Брайдлей объяснил это явление абберацией лучей света, идущего от звезды, вследствие чего она описывает на небесной сфере эллипс с большой полуосью, равной отношению скорости Земли к скорости света. При наблюдениях с Земли, обращающейся вокруг Солнца, телескоп (его оптическую ось) приходится наклонять на угол $\alpha = \arcsin \frac{v_{\oplus}}{c}$ в направлении движения Земли. Это важнейшее открытие стало непосредственным свидетельством обращения Земли вокруг Солнца. Что касается годичного параллактического смещения, то оно должно быть очень малым (менее $1''$), иначе его присутствие сказалось бы на наблюдаемом абберационном смещении.

Гринвичская обсерватория оставалась центром фундаментальных астрономических исследований, обладая новыми особо точными инструментами — в частности, пассажным инструментом с восьмифутовым телескопом и стенным квадрантом. Там Брайдлей продолжал наблюдения смещений звезд. В 1742 г. он был назначен директором обсерватории. Вторичные колебания положений — помимо абберации — были им замечены у γ Дра еще ранее. Оказалось, что их период равен примерно 19 годам, а амплитуда составляет около $18''$. Такие изменения положения звезд, согласно предположению, были связаны с колебаниями оси вращения Земли, вызванными тяготением Луны и обусловленными несферичностью фигуры Земли из-за ее сжатия. Обнаруженное явление, о котором Брайдлей сообщил в докладе Королевскому обществу в 1748 г., было названо нутацией.

В 1750–1762 гг. Бадлеем и его сотрудниками были определены координаты около 3 000 звезд с погрешностью, не превышающей нескольких секунд. При этом использовался 8-футовый (около 2.5 м) телескоп для наблюдений прямых восхождений и такого же размера квадрант. В ходе наблюдений Бадлей исследовал инструментальные ошибки, учитывал влияние рефракции, принимая во внимание ее зависимость от температуры и давления, а также использовал уровень. Посредством специальных таблиц учитывалась также абберация и нутация. Всего было проделано около 60 000 отдельных определений. Все это обеспечило высокую точность результатов, которые были опубликованы лишь в 1798–1805 гг. Интересно, что Невилл Маскелайн (1732–1811), с 1765 г. бывший Королевским астрономом, наблюдая на тех же инструментах, достиг еще более высокой точности.

В Гринвичской обсерватории с самого ее основания много внимания уделялось наблюдениям комет. Галлей, рассчитавший орбиты для 24 комет, высказал предположение о периодичности одной из них и указал длину периода 75 – 76 лет (см. лекцию X). В ожидании ее появления в 1758 г. французский математик и астроном Алексис Клеро (1713–1765), проанализировав путь кометы, пришел к выводу, что она должна испытать значительные возмущения от Юпитера. Рассчитав движение кометы, Клеро предсказал, что она появится в апреле 1759 г. (с опозданием на 618 дней) и она действительно достигла перигея в марте. Столь точное предсказание явилось еще одним убедительным подтверждением закона всемирного тяготения.

В математической формулировке закона Ньютона содержится константа G , называемая гравитационной постоянной. Ее значение можно определить только опытным путем, например, при известной массе Земли по измерениям ускорения свободного падения g . Для астрономии, как и для физики, важно независимое от астрономических данных определение G , по которому возможно найти массу Земли. В середине 50-х годов XVIII века были попытки определения значения g по отклонению маятника вблизи массивного объекта, например, горы. В 1774 г. Н. Маскелайном было найдено, что разность зенитных расстояний полюса в двух точках, находящихся по разные стороны одной из гор в Шотландии, отличается от разности, соответствующей линейному расстоянию между этими точками. Отсюда получалось среднее значение плотности Земли, а значит, находилась ее масса и значение G . Более точно значение G было определено в опытах Г. Кавендиша, измерявшего силу гравитационного взаимодействия двух массивных свинцовых шаров. Найденное таким путем значение G приводило по закону Ньютона к средней плотности Земли $\bar{\rho}_{\oplus} = 5.5 \text{ г/см}^3$, и соответственно для массы Земли получалось $\mathcal{M}_{\oplus} = 6 \cdot 10^{27} \text{ г}$. Еще Ньютон, используя

третий закон Кеплера, нашел, что масса Солнца $M_{\odot} = 330\,000 M_{\oplus}$; при указанной величине M_{\oplus} величина $M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33}$ г.

К середине XVIII века был окончательно выяснен вопрос о форме Земли. Измерения дуги меридиана, произведенные в Лапландии и во Франции, показали, что Земля является сжатым вдоль своей оси эллипсоидом, в полном соответствии с выводами Ньютона. Клеро создал теорию фигур планет, в которой учитывалось как действие гравитации, так и центробежной силы. Эта теория излагалась в его сочинении «Теория фигуры Земли, основанная на началах гидростатики» (1743 г.).

Для наблюдений прохождения Венеры по диску Солнца в 1761 и 1769 гг. было отправлено много экспедиций. В них, как отмечалось в прошлой лекции, участвовали и российские астрономы. В результате этих наблюдений оказалось, что величина параллакса Солнца находится между $8''.55$ и $8''.88$ (современные определения приводят к величине $8''.794$). Таким образом, к последней четверти XVIII века были с хорошей точностью установлены характеристики Солнечной системы — расстояния между входящими в нее телами и массы этих тел.

Во время наблюдений прохождения Венеры по диску Солнца было замечено, что при вхождении планеты на диск вокруг нее появляется светлый ободок. Это послужило основанием для М. В. Ломоносова сделать вывод о том, что Венера обладает атмосферой, а ободок появляется в результате рассеяния света в ней.

К достижениям науки XVIII века относятся результаты исследований по фотометрии германского астронома Иоганна Ламберта (1728–1777). В опубликованном в 1760 г. сочинении «Фотометрия» содержится описание способа измерения световых потоков от небесных светил. Тем самым впервые был создан метод еще не оформившейся к тому времени науки — астрофизики. Ламбертом была разработана теория отражения света от гладких поверхностей и введен термин «альbedo» как характеристика отражательной способности.

Трудами математиков XVIII века — Ж. Д'Аламбера, А. Клеро, Л. Эйлера, Ж. Лагранжа (1736–1813), П. С. Лапласа (1749–1827) внесен огромный вклад в небесную механику. Жан Д'Аламбер (1717–1783) опубликовал книгу «Аналитическая механика» (1743 г.), в которой был предложен общий подход к составлению дифференциальных уравнений, определяющих движения в системах материальных точек, и тем самым положено начало математической физике. Им исследовались проблемы возмущенного движения в небесной механике. В частности, изучение неравенств движения Луны послужило основой для составления соответствующих таблиц (1747–1756 гг.). Д'Аламбером была создана точная теория прецессии и выяснен физический смысл явления нутации (1749 г.), происходящей вследствие гравитационного действия Луны на «экваториальный пояс» Земли.

В те же годы теории возмущенного движения были посвящены труды Эйлера, опубликовавшего составленные им лунные таблицы (1745–1746 гг.). Продолжая совершенствовать теорию для составляемых Майером более точных таблиц, Эйлер в 1755 г. опубликовал сочинение под названием (в переводе с латинского) «Новая теория движения Луны». Предложенные в нем методы расчетов нашли применение при создании более современных теорий движения Луны в конце XIX и начале XX веков.

Еще в конце XVII века внимание астрономов привлекло отклонение движения Юпитера и Сатурна от предсказываемого расчетами. Юпитер двигался с ускорением, а скорость обращения Сатурна вокруг Солнца уменьшалась. Эти неравенства движения планет не получили объяснения в рамках развитой в первой половине XVIII века теории возмущенного движения, что заставило некоторых ученых сомневаться в универсальном характере закона всемирного тяготения. Даже такие математики, как Эйлер и Лагранж, не смогли выяснить причины наблюдаемых неравенств в движении этих планет. Решение проблемы после значительных усилий было получено Лапласом. История исследований по данной проблеме поучительна и на ней стоит остановиться подробнее.

Начиная с работ Эйлера решение задачи о возмущенном движении планет производилось при посредстве бесконечных рядов, которыми представлялись параметры оскулирующей орбиты. Члены ряда являются функциями времени. Зависимость возмущения от времени может выражаться степенной функцией ($\propto t^n$ при $n > 0$), периодической ($\propto \sin \nu t$) или их произведением ($\propto t^n \sin \nu t$). Соответственно возмущениями создаются вековые (монотонно растущие со временем) или периодические изменения параметров орбиты. Учесть все члены ряда невозможно, но, взяв некоторое число первых его членов, можно выяснить, как изменяется тот или иной элемент орбиты. Эйлер нашел, что в параметрах возмущенных орбит Юпитера и Сатурна присутствуют вековые члены. Он разделял мнение Ньютона о вековой неустойчивости Солнечной системы. В 1763 г. Жозефом Лагранжем (1730–1813) было подтверждено присутствие вековых членов в возмущениях Юпитера и Сатурна, но этого было недостаточно для объяснения наблюдаемых в их движении неравенств.

Пьер Симон Лаплас (1749–1827), учтя большее число членов рядов (1773 г.), пришел к выводу об устойчивости систем Солнце–Юпитер–Сатурн, так как влияние вековых членов должно взаимно компенсироваться. Средние расстояния планет от Солнца подвержены периодическим изменениям, но система в целом остается устойчивой. Затем Лаплас нашел, что и у других планет, в том числе у Земли, величина большой полуоси орбиты подвержена лишь небольшим периодическим изменениям и поэтому вся Солнечная система является устойчивой. В 1776 г. Лагранжем этот

вывод Лапласа было обобщен в отношении изменений эксцентриситетов и наклонов.

Значительную роль в дальнейшем развитии небесной механики сыграла другая работа Лагранжа. В 1772 г. им было предложено решение задачи трех тел для случая, когда одно из них имеет очень малую массу по сравнению с двумя другими (ограниченная задача трех тел).

Так как при сравнении прежних наблюдений (XVII век) с более новыми (вторая половина XVIII века) обнаружилось (Ламберт, 1773 г.), что характер изменений скорости движения Юпитера и Сатурна изменился — скорость обращения Юпитера уменьшалась, а Сатурна — увеличивалась, то исследования устойчивости были продолжены. Потребовались более полные вычисления, в результате которых выяснилось, что не только величины больших полуосей, но и эксцентриситеты подвержены периодическим изменениям. Лапласом было установлено (1784 г.) существование следующих соотношений:

$$\sum_{k=1}^n m_k e_k^2 \sqrt{a_k} = \text{const}, \quad \sum_{k=1}^n m_k \sqrt{a_k} \text{tg}^2 i_k = \text{const}.$$

В них m_k — масса k -ой планеты, e_k — эксцентриситет ее орбиты, a_k — большая полуось орбиты и i_k — наклон. Этими соотношениями ограничены вероятные изменения элементов орбит. В работе 1784 г. Лаплас показал, что долгопериодические (с периодом около 900 лет) возмущения больших планет обусловлены близостью периодов обращения Юпитера и Сатурна к резонансному соотношению. За 59 лет происходит пять обращений Юпитера и два обращения Сатурна, т. е. $P_{Jup} \approx \frac{2}{5} P_{Sat}$. Из-за указанной близости периодов сближения этих планет в пространстве (при соединениях) повторяются и происходит накопление изменений эксцентриситета, а значит, и долготы. Через 450 лет соединение происходит в другом положении планет и изменения эксцентриситета осуществляются в противоположном направлении.

Так как в результате сложных расчетов, проведенных путем последовательного применения закона всемирного тяготения, удалось объяснить сложное поведение планет, то тем самым еще раз была продемонстрирована универсальность этого закона. На его основе Лаплас также объяснял (1784 г.) представлявшееся загадочным ускорение движения Луны (смещение $\approx 10''$ за 100 лет), указывавшее на уменьшение размеров ее орбиты. Правда, расчеты Дж. Адамса (1853 г.) показали, что при учете членов более высокого порядка вековое ускорение составляет всего $5''$ за 100 лет. Лишь в XX веке выяснилось, что на движении Луны сказывается эффект приливного трения. Поскольку для обнаружения этого эффекта требуется очень точное измерение времени, было бы ошибочным считать полное

выяснение причин, приводящих к замедлению Луны, возможным в XVIII веке.

Результаты своих исследований движений небесных тел Лаплас изложил в фундаментальном труде «Трактат по небесной механике» в пяти книгах, издававшимся по частям (1799–1825 гг.) . Здесь впервые был использован термин «небесная механика». Рассматривая Солнечную систему как механическую, т. е. управляемую только законами механики, Лаплас утверждал, что движения полностью детерминированы, если определены начальные условия для всех тел, составляющих систему. Солнечная система подобна часам, механизм которых совершенен, они не нуждаются в поправках и их не нужно заводить. Механизм построен навсегда и неизменен. В течение всего XIX века эти утверждения не оспаривались, хотя они не основывались на результатах полных исследований — выводы теории возмущений, в которой используется лишь конечное число членов бесконечных рядов, нельзя считать исчерпывающими. Все же дальнейшее развитие небесной механики показало, что Солнечная система в течение долгого времени — сотен миллионов лет — должна оставаться устойчивой.

Лапласом были выполнены выдающиеся работы в математической физике и теории вероятностей, результаты которых в дальнейшем применялись и в различных разделах астрономии.

В 1796 г. появилось сочинение Лапласа «Изложение системы мира», ставшее широко известным не только среди ученых. Оно не содержало математических расчетов, и все рассуждения об устройстве Вселенной велись на качественном уровне. В одном из примечаний к этой книге излагаются гипотетические представления о происхождении Солнечной системы. В более распространенном виде эта гипотеза приведена в третьем издании книги (1808 г.) и в еще более полном — в пятом издании (1824 г.). Она дополнялась с учетом результатов наблюдений, выполненных В. Гершелем, которые будут описаны в лекции XII. Поэтому там и приводится подробное описание космогонических взглядов Лапласа. Здесь же упомянем некоторые из космогонических концепций, выдвинутых ранее. Речь идет, конечно, о научной космогонии, опирающейся на законы природы, в первую очередь на закон всемирного тяготения. Приведем первое из известных высказываний по проблеме происхождения Солнца и звезд, принадлежащее Ньютону:

«Но если бы материя была равномерно распределена в бесконечном пространстве, она не могла бы объединиться в одну массу, но некоторая часть ее образовала бы одну такую массу, другая часть — другую, так что от этого произошло бы бесконечное число больших масс, разбросанных на больших расстояниях друг от друга во всем этом бесконечном пространстве. Именно так могли произойти и Солнце, и неподвижные звезды, если

предположить, что материя была светящейся по своей природе».

(Письмо к Бентли, 10 декабря 1692 г.)

В этих словах высказана мысль о конкретном физическом механизме, впоследствии получившем название гравитационной неустойчивости. Возможность математического исследования эффективности этого механизма в отношении звездообразования появилась значительно позже — в XX веке (см. лекцию XVI) .

Знаменитый немецкий философ Иммануил Кант (1724–1804), проявлявший большой интерес к проблемам естествознания, опубликовал в 1755 г. сочинение «Всеобщая естественная история и теория неба». Книга была издана анонимно и оставалась практически неизвестной астрономам до середины XIX века. В ней предложена гипотеза для объяснения образования Солнечной системы. Кант предполагал, что вначале присутствовало «крайне разреженное вещество» (названное Хаосом), состоящее из «мелких твердых частиц». Из них под действием тяготения возникают сгущения в форме гигантских шаров, превращающихся затем в звезды. Так образовалось и Солнце, являющееся одной из звезд.

Гипотетическая «сила упругости» мешает этим шарам слипаться. Они движутся и увлекают в движение другие частицы, которые образуют вокруг больших тел сгустки, превращающиеся в планеты. Далее описывается картина гибели светил, образования Хаоса вновь и последующего «возрождения», т. е. образования «центрального мирового Солнца».

С точки зрения современной астрономии умозрительные построения, изложенные в книге Канта, не представляются ни сколько-нибудь обоснованными, ни «пророческими», какими их иногда стараются изображать. Однако сама постановка проблемы — введение понятия эволюции в систему мира и использование в качестве определяющего эволюцию фактора всемирного тяготения явилась в философском и мировоззренческом плане большим шагом вперед от господствовавших еще в первой половине XVIII века воззрений, основывавшихся на догмах религии.

В середине XVIII века И. Ламбертом были высказаны глубокие соображения о строении Вселенной. В книге «Космологические письма об устройстве Вселенной» (1761 г.) он высказывает мнение о бесконечности Вселенной и о том, что она обладает иерархической структурой, то есть состоит из звездных систем различного порядка. Пример системы первого порядка — Солнце и окружающие его планеты, системы второго порядка — скопления звезд, системы третьего порядка — Млечный Путь и т. д.

Вопрос о том, конечна ли Вселенная, долго оставался дискуссионным. Сторонники взгляда об ограниченности Вселенной в пространстве указывали, что если она является бесконечной, а звезды в ней распределены по

пространству равномерно, то яркость неба должна быть очень высокой, чего не наблюдается. В этом заключается так называемый «фотометрический парадокс». Его можно устранить, приняв иерархическую модель Вселенной. На той же основе может быть объяснен так называемый «гравитационный парадокс» о бесконечной величине гравитационного ускорения в бесконечной Вселенной.

Сформировавшиеся в XVIII веке отрасли науки — позиционная астрономия (астрометрия) и небесная механика к началу следующего века достигли больших успехов. Однако их было недостаточно, чтобы понять физические свойства небесных тел и их строение. Стало необходимым создание новых методов астрономических исследований.

Лекция XII

Конец XVIII — начало XIX века: становление звездной астрономии

Окончанию XVIII века предшествовало крупнейшее историческое событие — Великая французская революция, преобразившая не только политический строй Франции, но также ее экономику и культуру. Она оказала большое влияние на все европейские страны, даже на те, которые не были втянуты в начавшиеся после революции и продолженные Наполеоном войны. Хотя в этих войнах все страны испытывали огромные потери в людях, экономическая жизнь не только продолжалась, но и оживлялась благодаря увеличению торговых связей и необходимости совершенствования техники, причем не только военной. Кроме того, при массовом перемещении населения совершался вынужденный культурный обмен. В результате в Европе конца XVIII — начала XIX века происходили глубокие изменения и в духовной культуре, избавлявшейся от феодальной отсталости и менявшей при этом систему образования и организации научных исследований. Прежде всего такие перемены начались во Франции.

В 1795 г. в Париже была создана Нормальная школа, представлявшая собой высшее учебное заведение, в котором к преподаванию привлекались крупнейшие ученые, в частности Лаплас. В этой школе получили подготовку многие ставшие широко известными исследователи — математики О. Коши и С.Д. Пуассон, физик Ж. Гей-Люссак, оптик О. Френель и другие. Все они учились у Лапласа. В том же году вместо Парижской Академии наук был учрежден Национальный институт, в котором большинство из назначенных правительством членом состояло из бывших членов Академии. В течение ряда лет во главе «физико-математического разряда» Института находился Лаплас. Наполеон, придавая научной деятельности Института большое значение, вместе с тем старался использовать его для

укрепления своей власти. Восстановленная после падения Наполеона Академия наук, несмотря на уменьшившуюся ее роль в политике, занимала в ряде научных направлений ведущее место в Европе.

Важным для европейской культуры стало начавшееся еще в середине XVIII века оживление экономической и духовной жизни в ряде государств, на которые тогда была разделена Германия. Это проявилось не только в развитии производства, но и в росте уровня техники, особенно точного приборостроения, что имело особое значение для астрономии. Во многих германских университетах были созданы астрономические обсерватории, которые, конечно, не могли сравниться с Гринвичской и Парижской, но в дальнейшем сыграли видную роль в астрономических исследованиях.

Интересным представляется тот факт, что в течение почти сорока лет (с 70-х годов XVIII века до 10-х XIX века) наиболее значительные исследования в астрономии были выполнены не в крупных обсерваториях и университетах, а ученым-одиночкой, мало связанным с этими учреждениями. Последняя треть XVIII века стала временем рождения новой отрасли астрономической науки — звездной астрономии. Расширение изучаемого мира — выход астрономии далеко за пределы Солнечной системы — произошло благодаря самоотверженному труду Вильяма Гершеля, который, не получив университетского образования, стал тем не менее одним из самых выдающихся астрономов за всю историю этой науки. Его необычный путь в науку начался поздно — первая научная работа Гершеля была опубликована им в 42-летнем возрасте — и проходил он его почти в одиночестве.

Вильям Гершель родился в Ганновере (Германия) в 1738 г. в семье музыканта. В 1757 г. он по политическим мотивам эмигрировал в Англию. Там, в городе Бат, известном своими целебными источниками и поэтому часто посещавшимся английскими королями, он занимался музыкой, став композитором и одновременно дирижером оркестра, а с 1768 г. — органистом. При изучении книги по математической теории гармонии, написанной про-

Рис. 35. Вильям Гершель.

фессором астрономии Кембриджского университета Робертом Смитом, он узнал, что ее автору принадлежит также учебник оптики. Ознакомившись с этой книгой, в которой описывался способ полировки зеркал телескопов, Гершель, с юных лет интересовавшийся тайнами неба, решил сам построить телескоп. Первый из сделанных им телескопов — в 1774 г. — был небольшим, длиной менее двух метров. Увлечшись шлифовкой зеркал, он построил телескопы больших размеров — три метра и шесть метров (20 футов) с диаметром зеркала 47 см (1776 г.). Двадцатифутовый телескоп по своему качеству превосходил инструменты Гринвичской обсерватории и обеспечивал увеличение в 6 000 раз. Гершель сам занимался подбором сплавов для зеркал, отливкой заготовок и их шлифовкой. Кроме того, он

проектировал монтировку инструмента. Она была сложной, и управление телескопом оказывалось нелегким делом. Он подвешивался на вращающу-

Рис. 36. Телескоп Гершеля (фокусное расстояние 6.7 м).

юся раму, а наблюдатель с лестницы смотрел в окуляр, расположенный на верхнем конце трубы (рис. 36). Гершель отличался огромным трудолюбием и все работы выполнял при помощи только своих брата и сестры.

В 1777 г. Гершель вел наблюдения планет и Луны. Он определил высоту лунных гор, обнаружил вращение Марса и Юпитера. Это было сделано и ранее другими наблюдателями, но Гершель впервые обнаружил «полярные шапки» на Марсе. В 1780–1781 гг. Гершель производил тщательный обзор неба посредством семифутового телескопа с целью определения параллакс-ов дифференциальным методом. Он считал, что слабые звезды находятся далеко и их параллактическое смещение мало, а у ярких звезд (близких) оно должно быть заметным. В одну из ночей 1781 г. он заметил объект, непохожий на звезду, так как у него был виден диск. Затем выяснилось, что это светило перемещается среди звезд. Первоначально Гершель предположил, что он наблюдает комету, но по расчетам французских астрономов, выполненных с использованием обширного наблюдательного материала, оказалось, что светило является планетой, орбита которой находится за орбитой Сатурна. Открытие новой планеты, сначала называвшейся «звездой Георга», произвело большое впечатление на общество, и королем Георгом III была назначена Гершелю пенсия. Тогда он оставил занятия музыкой и полностью отдал свое время астрономическим наблюдениям. Название Уран открытая планета получила по предложению немецкого астронома И. Боде.

Гершелем, переехавшим в Слоу (около Виндзора), был построен телескоп с фокусным расстоянием около 20 м и диаметром зеркала в 140 см. Он был очень сложным в использовании, но позволял увидеть детали изображений планет, незаметные при наблюдениях на телескопах меньшего размера. В основном наблюдения производились на 20-футовом телескопе в главном фокусе со специальной площадки. Системой Ньютона Гершель не пользовался, считая, что при отражении от плоского зеркала теряется слишком много света.

Целью наблюдений в 1781–1784 гг. Гершель поставил составление каталогов двойных звезд, первый из которых, включавший 289 объектов, был опубликован в 1782 г., а второй, содержащий уже 434 системы — в 1784 г. Используя нитяной микрометр, он находил угловое расстояние между компонентами и позиционный угол. При измерении малых расстояний между ними (несколько секунд) нитяной микрометр не годился и применялся «ламповый микрометр», моделировавший систему двумя точечными изображениями.

Среди изученных Гершелем звездных пар было около пятидесяти таких, где обнаружилось изменение позиционного угла, что свидетельствовало о взаимодействии между компонентами и, таким образом, подтверждало всеобщность закона Ньютона.

Собственное движение некоторых звезд по небесной сфере было замечено еще Галлеем. Гершель поставил своей задачей определение движения Солнца, которое должно отражаться в видимых смещениях звезд. Измерив эти смещения, он нашел, что апекс Солнца (точка, куда направлена скорость его движения) находится вблизи звезды λ Her. Скорость движения Солнца тогда определить не удалось.

Одновременно с поисками апекса Солнца Гершель изучил строение Млечного Пути путем подсчета числа звезд, видимых в отдельных его участках. Таких участков было более тысячи. Предполагая — без достаточных оснований — что различие в блеске звезд обусловлено лишь их разной удаленностью от Солнца и считая распределение звезд в пространстве равномерным, Гершель, произведя более трех тысяч подсчетов («звездное зондирование»), установил, что Млечный Путь представляет собой линзовидное образование. В плоскости симметрии его радиус в 800 раз больше, чем среднее расстояние между звездами, а толщина составляет около 150 таких расстояний.

В лекции X было сказано о том, что в начале XVIII века на небе были замечены слабо светящиеся образования — «туманные пятна». Некоторые из них, как выяснилось из более поздних наблюдений, оказались звездными скоплениями — так называли совокупность большого количества слабых звезд. Однако некоторые из «туманных пятен» не удавалось разрешить на звезды. Французский астроном Ш. Мессье в 1781 г. составил список 103 «туманных объектов» для облегчения поисков комет, с которыми их можно было спутать. Как выяснилось впоследствии, в списке оказались как звездные скопления, так и образования, состоящие из светящегося газа — истинные туманности.

Заинтересовавшись ими, Гершель по собственным наблюдениям составил «Каталог тысячи туманностей и звездных скоплений», в котором сохранилось описание этих объектов и была проведена классификация их по группам. В 1789 г. вышел в свет второй каталог, включавший более тысячи туманностей, а в 1802 г. — третий, в котором их было более 500. Среди туманностей были обнаружены сходные по виду с планетами — они имели дискообразную форму и зеленоватый цвет. Гершель назвал их «планетарными туманностями». Встречались и туманности, по форме близкие к кометам. В 1792 г., проводя классификацию наблюдавшихся объектов, Гершель отделил далекие звездные системы («млечные туманные образования») от планетарных туманностей. Кроме того, им была выделена группа «планетарных туманностей с яркими центрами». Анализируя формы раз-

личных туманностей, Гершель пришел к выводу о происхождении звездных скоплений в результате сжатия газового облака под действием силы притяжения его частей друг к другу (что теперь называют самогравитацией). Из фрагментов облака образуются планетарные туманности, в дальнейшем превращающиеся в звезды. Звезды, рассеянные по объему скопления, могут, опять-таки в результате притяжения друг к другу, «сбиваться в кучу», образуя шаровые скопления. Некоторая доля газа, не превратившегося в звезды, создает светящийся фон.

Концепция эволюции звезд не встретила поддержки среди английских астрономов, находившихся под влиянием религиозных представлений о «сотворении мира» и в большинстве своем отвергавших саму идею эволюции. В то же время Лаплас, имевший для научного творчества лучшие, чем в Англии, условия, не ограничивавшие его религиозными догмами, использовал результаты наблюдений Гершеля и сделанные им выводы о том, как могли образовываться звезды, для подкрепления своей гипотезы о происхождении Солнечной системы. Ссылаясь на наблюдения Гершеля, он писал в сочинении «Изложение системы мира»: «Иногда туманная материя, конденсируясь равномерно, образует так называемые планетарные туманности. Наконец, еще большая степень конденсации превращает все это вещество в звезды».

По мнению Лапласа, вначале существовала очень большая туманность из разреженного вещества, в дальнейшем превратившегося в Солнце. Предполагалось изначальное вращение Солнца и соответственно вращение туманности, которая, сжимаясь, охлаждается. Вследствие сохранения момента количества движения скорость вращения туманности при сжатии возрастает, и она сплющивается, принимая линзообразную форму. Близкие к экватору частицы отрываются от шарообразного сгущения и образуют вращающиеся кольца, которые впоследствии превращаются в планеты. В рамках своей гипотезы Лаплас качественно объяснил геометрические и кинематические характеристики Солнечной системы.

Гипотеза Лапласа существенно отличается от гипотезы Канта тем, что она основана на данных наблюдений и опирается на установленные законы механики. При этом Лаплас ограничивается лишь проблемой происхождения Солнечной системы, не затрагивая эволюцию Вселенной в целом. Поэтому использование названия «гипотеза Канта–Лапласа» неправомерно.

В течение XIX века гипотеза Лапласа стала популярной в связи с признанием учеными и значительной частью общества идеи о происходящей в природе эволюции.

В 1811–1814 гг. Гершель продолжал развивать свою концепцию образования звезд, подчеркивая непрерывность всего процесса эволюции вещества в Галактике.

Невозможно переоценить значение трудов Гершеля для астрономии и прежде всего значение создания им научных представлений о структуре Галактики, выделения и классификации галактических туманностей как важнейших для понимания эволюции звезд и звездных систем. Заметим, что, будучи самоучкой, он обладал непредвзятым мышлением и, создавая свою концепцию происхождения звезд, смог предвосхитить некоторые основополагающие положения теории звездной эволюции, созданной лишь в XX веке. Среди открытий Гершеля важным, и не только для астрономии, но и для физики, явилось обнаружение и исследование невидимого глазом инфракрасного излучения Солнца по показаниям термометра, помещенного за границей видимой области спектра (1800 г.).

Одно из предпринятых Гершелем исследований оказалось не столь успешным, как большинство других его работ. Это была попытка поиска переменности среди 3000 звезд, включенных в «Британский каталог» Флемстидом, где указывалась и звездная величина каждой звезды. Гершелю удалось обнаружить лишь одну переменную звезду α Her, а для остальных надежных свидетельств переменности получено не было. Возможно, что причиной этого явилась недостаточная разработанность способов измерения видимого блеска звезд. Вместе с тем уже при визуальных наблюдениях, выполнявшихся в XVIII веке, было открыто несколько звезд, периодически изменяющих свой блеск. В первом каталоге переменных звезд содержалось 12 объектов, среди них σ Cet (Мира Кита), β Lyr и δ Ser (последние две были открыты Джоном Гудрайком (1764–1786) в 1784 г.). Однако спустя только полвека были разработаны достаточно надежные методы фотометрии и звездная переменность стала изучаться систематически.

В отличие от астрономов Англии и Франции, продолжавших в конце XVIII и начале XIX веков традиционные наблюдения в больших обсерваториях, обладавших первоклассным оборудованием, возможности ученых других стран — Германии, Италии, России — для организации наблюдений вынуждали ограничиваться изучением Солнечной системы. При этом им удалось достичь существенного прогресса, выразившегося прежде всего в обнаружении и исследовании малых тел — астероидов и углублении знаний о кометах.

Германский ученый И. Тициус нашел простое по форме соотношение между расстояниями планет от Солнца, о котором астрономы не знали до тех пор, пока известный астроном Иоганн Боде (1747–1826), опубликовавший «Атлас неба» (1778 г.), не сообщил об этом в своей книге. Если принять за единицу расстояние Земли от Солнца, то расстояния до других планет определяются формулой

$$a_n = 0.3 \cdot 2^n + 0.4,$$

где для Меркурия $n = -\infty$, для Венеры $n = 0$, для Земли $n = 1$, для Марса $n = 2$, для Юпитера $n = 4$ и для Сатурна $n = 5$. Это соотношение называли правилом Тициуса–Боде. Такая зависимость приводила к мысли о том, что между Марсом и Юпитером должна находиться еще одна планета, для которой $n = 3$. После открытия Урана, для расстояния которого от Солнца правило Тициуса–Боде выполняется при $n = 6$, многие астрономы еще более укрепились в мнении о том, что следует искать планету, которая соответствует этому правилу при $n = 3$. Одним из энтузиастов поисков был австрийский астроном Франц Цах, даже рассчитавший эфемериду гипотетической планеты. С 1800 г. в Готе им стал издаваться журнал «Ежемесячные корреспонденции» с целью создания детальных карт области эклиптики, которые должны были облегчить поиски планеты и проведение наблюдений. Осенью того же года в обсерватории Лилиенталь около Бремена было создано «Объединенное астрономическое общество». В нем были и иностранные астрономы.

В новогоднюю ночь 1801 года итальянский астроном Джузеппе Пиацци из Палермской обсерватории заметил перемещающийся среди звезд объект седьмой звездной величины и назвал этот объект — как планету — Церерой. Он не успел рассчитать ее орбиту до того, как она из-за близости к Солнцу перестала наблюдаться. Чтобы подобные случаи не повторялись, нужно было иметь возможность быстрого расчета орбиты по трем наблюдениям близко отстоящих положений светила (по малой дуге). Метод, облегчавший расчеты в десятки раз — они выполнялись за часы, а не в течение недель — предложил Карл Гаусс (1777–1855). До этого (в 1797 г.) немецкий астроном-любитель Генрих Ольберс (по профессии врач) разработал способ расчета орбит комет в предположении, что их орбиты параболические. Метод Гаусса применим для расчетов движения по любым — не только эллиптическим, но также гиперболическим и параболическим орбитам. В сочинении «Теория движения небесных тел» (1809 г.) Гаусс описал как этот, так и другие методы расчета орбит, используемые до настоящего времени, там же изложены теория ошибок и метод наименьших квадратов определения погрешностей наблюдений.

После расчетов орбиты Цереры по методу Гаусса она была вновь обнаружена. Вторая малая планета (Паллада) была открыта Ольберсом в 1802 г. Она двигалась по орбите, близкой к орбите Цереры. Открытия Юноны в 1804 г. в обсерватории Лилиенталь Гардингом и Весты (Ольберс, 1807 г.) стали последними в этом ряду — в течение последующих сорока лет других малых планет не было обнаружено. Орбиты всех четырех планет располагались между орбитами Марса и Юпитера. Расчеты их движения при учете возмущений от больших планет составили предмет ряда исследований.

В начале XIX века в Германии были достигнуты значительные успехи в проектировании и изготовлении астрономических инструментов. Мастерская Репсольда в Гамбурге, основанная в 1803 г., изготовляла пассажные и другие инструменты высокого качества, а в Мюнхене с 1804 г. делали инструменты с точно разделенными кругами, снабженные микроскопами для отсчетов делений, которые производились с точностью до $0''.1$. Это обеспечивало повышение точности звездных каталогов.

Прогрессу не только позиционной астрономии, но и зарождавшейся в первой половине XIX века астрофизики в большой степени способствовали труды Йозефа Фраунгофера (1787–1826). С 19 лет он работал в оптической мастерской, а в 1817 г. при поддержке меценатов им был организован в Мюнхене Оптический институт. Первая из решавшихся там Фраунгофером задач состояла в усовершенствовании процесса изготовления стекол, из которых делались линзы для телескопов. Он начал с улучшения технологии отливки больших стеклянных дисков, служивших заготовками для линз. После многих испытаний Фраунгофер смог добиться того, что в изготавливаемых из флинтгласа дисках диаметром 20–30 см не содержалось внутренних дефектов.

Другая задача, решавшаяся Фраунгофером, состояла в нахождении способов точного определения показателей преломления света разных цветов в линзах и призмах. Физик В. Волластон еще в 1802 г. нашел, что в прошедшем через призму свете от Солнца на фоне непрерывно меняющегося цвета имеются узкие темные полосы — «линии». Фраунгофер обнаружил более 500 таких линий и систематизировал их «по силе», обозначив наиболее выдающиеся из них буквами А, В, С, D, E, F, G, H. В дальнейшем темные линии получили название фраунгоферовых. Он использовал их в качестве индикаторов для выделения особенностей излучения, проходящего сквозь призму, и определения на основе этого величины показателя преломления у оптических стекол разных сортов. Фраунгофер обнаружил, что подобные же линии появляются при прохождении сквозь призму света от Луны и планет. В излучении некоторых звезд, прошедшем сквозь призму, также наблюдались темные линии. Более того, Фраунгофер нашел, что в излучении, испускаемом горящим растительным маслом и прошедшем сквозь призму, присутствует такая же линия, как и в излучении Солнца, обозначенная им D. Однако дать истолкование этому факту он не смог.

Фраунгофер ввел новый важный элемент в монтировку телескопов, направив одну из осей вращения инструмента на Полюс Мира. Труба телескопа закреплялась таким образом, что она могла вращаться вокруг этого направления, составляя с ним угол, равный склонению наблюдаемого светила. Приспособив механизм, заставляющий ось склонений вращаться в

Рис. 37. Телескоп Фраунгофера — экваториальная монтировка.

указанном направлении, он получил возможность обеспечить следование телескопа за светилами в их суточном движении, так что в поле зрения эти объекты оставались неподвижными. Подобная монтировка оказалась исключительно удобной для наблюдательной астрономии, в особенности при фотографировании звезд и при получении их спектров.

Фраунгоферу принадлежит также усовершенствование инструмента для точного определения угловых расстояний между двумя близкими друг к другу небесными объектами. Астроном П. Бугер задолго до работ Фраунгофера — в 1724 г. — изобрел прибор для измерения величины диаметра Солнца — гелиометр. Это был телескоп с двумя объективами, в котором получались два изображения Солнца. Перемещая объективы посредством микрометрического винта, можно было добиться сближения этих изображений. Расстояние между центрами соприкасающихся изображений служило мерой углового поперечника Солнца. В 1753 г. прибор видоизменили, использовав вместо двух объективов один, разрезанный пополам так, что половины его могли смещаться друг относительно друга. Таким смещением достигался тот же эффект, что и в гелиометре Бугера. Этот прибор был модифицирован Фраунгофером, который поместил обе половины объектива в оправу, снабдив ее градуированным микрометрическим винтом для точного определения смещения половин объектива. С помощью гелиометра угловые расстояния между звездами определялись гораздо точнее, чем при использовании нитяного микрометра.

Лекция XIII

Достижения позиционной астрономии и небесной механики в 20 – 40-е годы XIX века

После окончания наполеоновских войн в Европе начался сравнительно спокойный от потрясений период экономического развития. Происходило окончательное оформление новой структуры общества, избавившегося от феодальных пережитков, и совершался переход от мануфактур к машинному производству. В это время научный прогресс не сопровождался крупными открытиями — время новой физики только начиналось.

В астрономии также происходило оформление тех ее разделов, которые были созданы в предыдущее столетие — позиционной астрономии и небесной механики. Решение таких проблем, как обнаружение годичного параллакса звезд и открытие новой планеты на основе расчетов ее гравитационного действия, показало, что «классическая» астрономия достигла зрелости. Вместе с тем, структура Солнечной системы была достаточно полно исследована в количественном плане — определены расстояния между входящими в нее телами, массы этих тел и, за некоторым исключением, хорошо описывалось их движение, что позволило создавать надежные эфемериды. Что же касается «прорыва» в Галактику, совершенного Гершелем, то он еще не получил развития и звездная астрономия находилась в зачаточном состоянии. Как в существовавших в XVIII веке, так и во вновь созданных обсерваториях проводились традиционные работы по каталогизации звезд, вычислению эфемерид и уточнению характеристик небесных тел, входящих в состав Солнечной системы. Уровень их непрерывно повышался благодаря развитию наблюдательной техники и улучшению методики наблюдений. В первую очередь усовершенствованию в 20 – 40-х

годах подверглись методы позиционной астрономии. Оно было настолько глубоким, что до середины XX века эти методы почти не изменялись. Повышением своего уровня астрометрия обязана главным образом трудам Бесселя.

Фридрих Вильгельм Бессель родился в 1784 г. в небольшом городе Минден (в северо-западной части Германии). Оставив в тринадцать лет гимназию, он учился самостоятельно, а в пятнадцатилетнем возрасте поступил на службу в контору торговой фирмы в Бремене. Она вела торговлю с далекими странами, и Бесселя привлекала возможность совершения морских путешествий. Он стал знакомиться с навигационной наукой, в первую очередь с ее астрономической основой. Появившийся у Бесселя интерес к астрономии привел его к самостоятельному изготовлению секстанта и наблюдениям небесных светил. Следующий шаг в астрономии Бессель сделал, рассчитав элементы орбиты кометы Галлея по старым наблюдениям, произведенным во время ее появления в 1607 г. Ольберс (живший в Бремене), а также Гаусс одобрили эту работу, и в 1804 г. она была опубликована.

В 1806 г. Бессель, уйдя со своей должности в фирме, стал ассистентом в уже упоминавшейся обсерватории Лилиенталь, принадлежавшей И. И. Шретеру. Она обладала хорошими инструментами — среди них рефлектором с фокусным расстоянием 8.5 м. Наряду с наблюдениями комет и недавно открытых малых планет Бессель производил исследование инструментов. Им была также начата обработка материалов многолетних наблюдений звезд, выполненных в Гринвичской обсерватории Брадлеем.

За несколько лет известность Бесселя как опытного астронома стала настолько широкой, что при решении правительством Пруссии вопроса о строительстве обсерватории при Кенигсбергском университете ему была предложена должность ее директора. Строительство обсерватории продолжалось с 1810 по 1813 гг. Она была оборудована достаточно совершенными инструментами, которые изготавливались в германских мастерских — пассажным инструментом и вертикальным кругом.

Около восьми лет заняла у Бесселя обработка наблюдений Брадлея. Им было предпринято исследование ошибок инструментов, на которых Брайлей производил наблюдения, и строго учтено влияние на результаты наблюдений рефракции, а также прецессии и нутации. Итоги всей этой работы Бессель опубликовал в книге «Основы астрономии» (1818 г.). Очень важным в этой книге было изложение созданной Бесселем теории редуций — «приведения на видимое место» — при учете абберации, годичного параллакса (тогда еще не наблюдавшегося), прецессии и нутации. Каталог точных положений 3222 звезд, полученный Бесселем после обработки наблюдений Брадлея, имел среднюю ошибку $\pm 0^s.16$ по α и $\pm 1''.3$ по δ и был наиболее точным из имевшихся в то время. Сравнивая содержащиеся в нем данные с теми, которые были в каталогах, составленных ранее,

Бессель нашел, что уточненное значение постоянной лунно-солнечной прецессии равно $50''.34$, а также определил годовые собственные движения с погрешностью $0''.2$.

По этому каталогу, а также по другим, составленным самим Бесселем, им был образован первый фундаментальный каталог, содержащий 38 звезд — «Кенигсбергские таблицы» (1830 г.). Эта система использовалась с 1830 по 1860 год в «Берлинском астрономическом ежегоднике», а также в ежегодниках, издававшихся в других странах.

С 1813 по 1846 гг. продолжалось интенсивное исследование всех инструментов Кенигсбергской обсерватории. Важнейшим элементом предпринятой Бесселем реформы практической астрономии стала разработка теории ошибок — как инструментальных, так и обусловленных внешними причинами. Наблюдения Бесселем проводились преимущественно посредством пассажного инструмента и вертикального круга — определялись одновременно (с использованием часов) прямое восхождение и склонение светила. Систематические ошибки возникают из-за наклонности горизонтальной оси, погрешности азимута и коллимации. Кроме того, источником погрешностей является неправильность цапф горизонтальной оси. Бесселем были разработаны методы определения величин всех этих ошибок и поправок для их учета. Кроме того, Бессель исследовал ошибку, обусловленную зависимостью фиксации моментов прохождения звезды через нити сетки от личности наблюдателя — «личное уравнение», которая объясняется, как он выяснил, психологическими особенностями наблюдателей. В течение ряда лет Бессель фиксировал эффект этой зависимости, которую невозможно устранить, а оценивать и учитывать ее приходилось только на основе экспериментов.

Многие из ошибок связаны с погрешностями, допущенными при изготовлении разделенных кругов, и деформациями конструкций инструментов под действием силы тяжести. Кроме того, на точности наблюдений сказываются и случайные ошибки, распределенные, как установил Бессель, по нормальному закону и возникающие как по инструментальным причинам, так и вследствие внешних факторов.

В 1821–1833 гг. Бесселем выполнялась обширная программа зонных наблюдений для составления каталога всех звезд до 9^m в полосе значений склонения от -15° до $+45^\circ$. Для этого был приобретен очень точно разделенный меридианный круг, изготовленный в мастерских Рейхенбаха. За 12 лет Бесселем было сделано более 75 000 наблюдений. Зонный каталог использовался для составления звездных карт экваториального пояса, которые издавались в 1826–1860 гг. под руководством Н. Энке. Они сыграли видную роль в открытии слабо светящихся небесных объектов — малых планет.

Проблема обнаружения годичного параллактического движения звезд, отражающего обращение Земли вокруг Солнца, стояла перед астрономами со времен Коперника. До XIX века, несмотря на совершенствование инструментов, посредством которых измеряются углы между небесными объектами, параллактическое смещение не наблюдалось. Бессель потерпел неудачу в своих попытках обнаружить и измерить параллакс двух звезд (1815–1816 гг.) и до 30-х годов к этому не возвращался.

В 20-е годы Вильгельм Струве (1793–1864), ставший в 1814 г. директором Дерптской обсерватории, выполнил множество наблюдений двойных звезд с целью определения их относительных движений. При этом он использовал рефрактор с объективом диаметром 24 см и нитяной микрометр. В это время параллактическое смещение им не было обнаружено, и он заключил, что годичный параллакс звезд π не превосходит $1''$. Возможно, именно по этой причине Бессель долго не возобновлял попыток нахождения параллакса, так как понимал необходимость усовершенствования техники и методики наблюдений.

Обладателем такой техники Бессель стал, когда в 1829 г. в Кенигсбергской обсерватории был установлен гелиометр, изготовленный Фраунгофером в 1827 г. В 1834 году начались наблюдения звезды β Cyg для определения ее годичного смещения. Это звезда обладает очень большим собственным движением, что могло указывать на близость к Солнцу и послужило причиной выбора ее Бесселем для поисков годичного параллакса. Положение звезды β Cyg определялось по отношению к двум слабым соседним звездам. Проведенные в 1837–1838 гг. наблюдения привели к выводу о том, что годичный параллакс β Cyg равен $\pi'' = 0.3136 \pm 0.0202$ (современные определения дают для π значение $\pi'' = 0.293 \pm 0.03$). Такое значение π'' соответствует расстоянию до звезды, равному 10.3 св. лет. Полученную величину π'' Бессель счел достойной опубликования и его работа появилась в английском журнале *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* в 1838 г. Близкое к указанному значению параллакса β Cyg Бессель нашел после проведения второй серии наблюдений в 1838–1839 гг., подтвердив, таким образом, его реальность. Астрономическое сообщество нашло вполне заслуживающей доверия использованную методику нахождения параллакса.

В 30-е годы в Дерптской обсерватории В. Струве возобновил поиски годичного параллакса, выбрав для этого звезду α Lyr, большая яркость которой давала основание считать ее близкой к Солнцу. В 1836 г. им было получено значение π , оказавшееся, как было установлено впоследствии, мало отличающимся от истинного. Однако Струве, посчитав, что имевшихся наблюдений недостаточно, и возобновив их, получил в 1837–1838 гг. вдвое большее, чем найденное до этого, значение параллакса, которое и опубликовал как правильное. Ввиду такого несоответствия между результатами

двух последовательных определений π отношение к ним астрономов не было столь единодушным, как к работе Бесселя. Однако достижение Струве было признано, как и обнаружение в 1838–1839 гг. Т. Гендерсоном — тогда директором Капской обсерватории — годичного параллакса звезды α Сеп. Система α Сеп — ближайшая к Солнцу, ее годичный параллакс $\pi'' = 0.751$. Публикация об этом открытии появилась лишь в 1839 г. Гендерсон использовал иной метод нахождения параллакса — измеряя непосредственно прямое восхождение и склонение для обеих компонент этой двойной звезды и сравнивая их.

Практически одновременными и независимыми определениями годичного параллакса звезд в обсерваториях трех стран была решена одна из труднейших проблем астрономии.

Многосторонние интересы Бесселя включали также изучение комет. В одной из работ (1836 г.) он высказал мысль о том, что вещество кометы «способно к возгонке» в результате «отталкивающего действия Солнца», о возможности которого ранее высказывались Лаплас и Ольберс (без какой-либо детализации). Улетучивающиеся частицы этого вещества движутся в противоположную от Солнца сторону, образуя хвост кометы. Бессель произвел математический анализ процесса образования хвоста и тем самым предвосхитил «ледяную модель» строения кометных ядер, обоснованную лишь во второй половине XX века.

Ряд работ Бесселя относился к небесной механике. Он определял массы планет по движению их спутников и по их возмущающему действию на движение комет. Бессель также усовершенствовал теорию затмений. Им была введена до сих пор используемая система координат, облегчающая предвычисление обстоятельств затмения для любой точки земной поверхности. Кроме того, он исследовал форму земного эллипсоида, занимался проблемами гравиметрии и принимал практическое участие в организации градусных измерений. Хорошо известны математические работы Бесселя. В одной из них (1824 г.) при исследовании планетных возмущений широко использован аппарат функций, называемых теперь бесселевыми.

О высоком качестве наблюдений, производившихся Бесселем, свидетельствует его вывод о существовании у звезд Сириус и Прокцион «невидимых спутников», сделанный на основании наблюдаемых особенностей их собственных движений. Справедливость этого вывода, встреченного многими известными астрономами с недоверием, была полностью подтверждена открытием в 1862 г. спутника у Сириуса. У Прокциона спутник был обнаружен в 1896 г. Сомнение вызывало замеченное Бесселем движение земных полюсов (на $0''.3$ за два года). Лишь в конце века факт движения полюсов был признан.

Одной из важных проблем, вставших перед небесной механикой в первые десятилетия XIX века, было выяснение причин отклонения наблюда-

емого движения Урана от рассчитываемого по закону всемирного тяготения при учете возмущающего действия всех планет. Сотрудник Лапласа Бувар составил таблицы движения Урана. Различие между вычисленными в них и наблюдаемыми положениями планеты возрастало, достигнув к 1840 г. величины $1'.5$. Вопросом о причинах отклонения движения Урана от расчетного интересовался Бессель, предположивший существование более далекой, чем Уран, планеты, вызывающей возмущения его движения. Составив план поиска этой планеты, он поручил своему помощнику Ф. Флемингу обрабатывать все имеющиеся наблюдения Урана и на их основании определить орбиту и массу возмущающего его движение тела. Флеминг в 1840 г. умер, а Бессель был настолько занят другими делами, что не смог закончить начатую по его плану работу.

Во Франции расчетами орбиты гипотетической планеты на основе наблюдаемых неравенств движения Урана занимался Урбен Жан Леверрье (1814–1877). Пересмотрев в 1845 г. теорию движения Урана, он в июне 1848 г. опубликовал результаты вычисления орбиты той планеты, которая по предположению возмущала движение Урана, и приближенно указал положение, которое она в данное время занимает на небесной сфере. Несколько ранее — в сентябре 1845 г. — о результатах аналогичных расчетов сообщил английский математик Дж. Адамс (1819–1892). В Гринвичской обсерватории к поиску планеты в области неба, указанной Адамсом, отнеслись недостаточно внимательно и не приложили усилий для ее обнаружения. Со своей стороны Леверрье обратился к астроному Берлинской обсерватории И. Галле с просьбой изучить указанную им область неба и выяснить, не выглядит ли какое-нибудь из находящихся там светил как светящийся диск. Благодаря тому, что в распоряжении Галле была только что отпечатанная Берлинской академией наук карта неба, изготовленная по наблюдениям на 28-сантиметровом рефракторе, он обнаружил планету, видимая величина которой была довольно значительной ($\approx 8^m$). Вновь открытой планете дали название Нептун.

Открытие планеты «на кончике пера» продемонстрировало силу научных методов и подтвердило правильность сложившихся к этому времени у астрономов представлений о строении Солнечной системы и высокую точность, с которой выполняется закон всемирного тяготения. В течение ряда лет в околonaучных кругах велись споры о приоритете открытия Нептуна, которые ничего не дали науке и не смогли испортить существовавшие между Адамсом и Леверрье хорошие отношения. Открытие Нептуна стало триумфом международного сотрудничества в науке.

В дальнейшем высказывались взгляды, согласно которым открытие Нептуна произошло случайно, так как последующие расчеты приводили к значительно большей величине большой полуоси его орбиты a (38 а. е. вместо 30 а. е.). Величина a оценивалась Леверрье и Адамсом в предполо-

жении, что и для искомой планеты справедливо правило Тициуса–Боде. Однако решения задачи о положении Нептуна, полученные как Адамсом, так и Леверье, давали достаточно хорошее представление о движении Нептуна по небу и его положении именно для периода между 1790 и 1850 гг., т. е. к тому периоду, когда наблюдались неравенства движения Урана, на которых основывались расчеты.

Развитие теории возмущенного движения выразилось не только в открытии Нептуна, но и в успехах кометной астрономии. Оказалось, что некоторые из комет, наблюдавшихся в первой половине XIX века, движутся не по параболическим, а по эллиптическим орбитам, причем имеют малые периоды обращения, составляющие всего несколько лет. Период обращения открытой в 1818 г. кометы Энке равен 3.3 года, так что ее орбита помещается внутри орбиты Юпитера. По возмущениям движения кометы при ее прохождении около Меркурия (1835 г.) удалось определить его массу. Интересным обстоятельством, причины которого тогда оставались непонятными, оказалось постепенное уменьшение периода ее обращения.

Афелии орбит короткопериодических комет группируются около больших (массивных) планет — Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна. Эти кометы, проходя близко от той или иной планеты, испытывают сильное возмущение, переходят на другие орбиты и оказываются связанными с планетой.

Достижения астрономии в первой половине XIX века в значительной мере были обусловлены изменением «культурного климата» не только в странах Западной Европы, но также в России и США. Почти одновременно там были построены крупные обсерватории, деятельность которых начала играть важную роль в прогрессе астрономии.

При огромных размерах территории России для составления географических карт требовалось определить множество астропунктов, а развитие мореплавания вызывало потребность в людях, обеспечивающих навигацию, которые должны знать астрономию. Для решения этих задач российские астрономы проводили активную деятельность, важнейшая роль в которой принадлежала академику Ф. И. Шуберту (1758–1825) и В. К. Вишневному (1789–1855). Шуберт с 1803 г. был директором академической обсерватории в Петербурге. Он внес значительный вклад в теорию движения планет, издал курс теоретической астрономии и создал руководства по определениям географических координат. При его содействии была организована Морская обсерватория в Николаеве (1827 г.) и такие же обсерватории в Кронштадте и Або (ныне г. Турку в Финляндии). Вишневецкий с 1806 по 1815 гг. определил координаты 250 астропунктов в европейской части России. С 1815 по 1835 гг. он читал лекции по астрономии в Петербургском университете.

В 1833–1837 гг. по инициативе и при поддержке ректора Казанского университета Н. И. Лобачевского при университете была построена астро-

номическая обсерватория. Лобачевский со студенческих лет глубоко изучал небесную механику и наблюдательную астрономию. В Казанском университете в течение нескольких лет был профессором известный австрийский астроном И. Литтров (1781–1840).

В 1820–1830 гг. наиболее оснащенной инструментами и активно работающей была Дерптская обсерватория. Поэтому естественно, что при решении вопроса о строительстве в России большой («Главной») астрономической обсерватории директору Дерптской обсерватории В.Я. Струве (1793–1864), широко известному в научных кругах европейских стран, было предложено разработать научные планы будущей обсерватории и руководить ее строительством.

В 1830 г. по поручению Академии наук В. Струве посетил ряд европейских стран с целью ознакомления с деятельностью имевшихся там астрономических обсерваторий. После его возвращения правительство приняло решение (1833 г.) о строительстве в окрестностях Петербурга обсерватории, которое началось в 1835 г. Инструменты для нее были заказаны у лучших немецких мастеров. Среди них был пятнадцатидюймовый рефрактор Мерца — самый крупный из существовавших в то время. В августе 1839 г. состоялось торжественное открытие Пулковской обсерватории.

Рис. 38. Пулковская обсерватория (фотография 60-х годов XIX в.).

В качестве основного направления деятельности обсерватории была выбрана позиционная астрономия: «составление обширных и наилучших по точности каталогов положений звезд на небе». Наряду с организацией чисто астрономических исследований перед Пулковской обсерваторией ставилась задача выполнения наблюдений, «необходимых для географических предприятий» и предполагалось «всеми мерами содействовать усовершенствованию практической астрономии». Обсерватория должна была координировать деятельность университетских обсерваторий.

В Пулковской обсерватории составлялись очень точные каталоги прямых восхождений и склонений звезд — первый из них для эпохи 1845.0. Она заняла прочное положение в отношении каталожных работ, проводившихся в европейских обсерваториях.

Для обеспечения потребностей мореплавания в США (в Вашингтоне) в 1842 г. была организована Морская обсерватория. Что же касается университетских обсерваторий в США, то в XIX веке они организовывались не на государственные деньги — их строительство и дальнейшую деятельность субсидировали частные лица. В 1840 г. при Гарвардском университете (Кембридж, штат Массачусеттс) была основана обсерватория, в которой был установлен телескоп такого же размера, как имевшийся в Пулковской обсерватории. В последующие годы эта обсерватория стала важным центром развития астрономии в Западном полушарии.

Среди событий в астрономии первой половины XIX века выделяется постройка У. Парсонсом (лордом Россом) в Ирландии в 1842–1845 гг. гигантского телескопа с зеркалом диаметром 182 см. При наблюдениях на этом телескопе в туманности М51 и затем еще в нескольких туманностях была обнаружена спиральная структура. Объяснения такой особенности туманностей в то время не имелось.

Лекция XIV

Физика в 40 – 80-е годы XIX века. Зарождение астрофизики

Ко второй половине XIX века созрели условия для ускоренного развития естественных наук. Внимание общества к ним усиливалось в связи с выдающимися успехами науки в познании природы, которые реализовались и в практической деятельности. Это относилось прежде всего к физике и биологии. Эволюционные идеи, внесенные в биологию Ж. Б. Ламарком, и теория эволюции, созданная Чарльзом Дарвином, сильно повлияли на развитие и других наук — даже гуманитарных, например, истории. Метафизические взгляды на природу стали заменяться эволюционными представлениями. Оказалась недостаточной механистическая система мира, созданная в XVIII веке, хотя механика как наука развивалась. В рассматриваемый период был установлен принцип наименьшего действия и получили обоснование использовавшиеся механикой математические методы. В физику вошло понятие о теплоте как фундаментальное понятие, расширявшее представления о законах природы.

Количественная мера теплоты была введена раньше, как и понятие о теплоемкости. Распространение тепла в пространстве — теплопроводность — было исследовано Ж. Б. Фурье, давшим математическое описание этого процесса (1811 г.). В 1824 г. Сади Карно показал, что поток тепла между телами неодинаковой температуры может обеспечить механическое движение, то есть производить работу. Все, что совершает работу, в физике объединяется понятием энергии (термин «энергия» был введен и использован в 40-х годах Р. Майером, Г. Гельмгольцем, У. Томсоном — лордом Кельвином; до этого говорилось о силах, под которыми подразумевалась и энергия).

Роберт Майер (врач по профессии) высказал утверждение о том, что полная энергия (под этим понималась сумма механической и тепловой энергий) неуничтожима, т. е. постоянна (1842 г.), а спустя пять лет Дж. П. Джоуль не только подтвердил это заключение в форме — «ничто не растрачивается, ничто не утрачивается», но и установил количественно механический эквивалент тепловой энергии.

Еще один шаг в расширении понятия энергии был сделан трудами М. Фарадея (1843 г.), эмпирически изучившего связь между электрическими и магнитными явлениями. Введение понятия электрического и магнитного полей и создание (1861 г.) Дж. К. Максвеллом теории, устанавливавшей математически взаимосвязь этих полей, стало огромным вкладом в физику и сыграло видную роль в дальнейшем развитии естественных наук, которая выяснилась лишь в XX веке.

Важнейшим для астрономии разделом физики в XIX веке оказалась термодинамика. Рассмотрение цикла Карно (1824 г.), описывающего действие механизма, переводящего теплоту в механическое движение, показывало, что при неизменности температуры этот процесс невозможен. Такой вывод предварял «второе начало термодинамики», которое было сформулировано в 1852 г. Кельвином. Из него вытекало, что в природе существует тенденция к уменьшению механической энергии вследствие перехода ее в теплоту. Введение Р. Клаузиусом понятия энтропии (S) системы, подчиняющейся законам термодинамики, позволило выразить второе начало термодинамики в следующем виде:

$$\frac{dS}{dt} > 0.$$

Это означает, что в замкнутой системе (изолированной от влияния других систем) энтропия возрастает со временем. Таким образом, был сформулирован еще один, после закона всемирного тяготения, универсальный закон природы. Рассматривая мир (Вселенную) как замкнутую систему, Клаузиус формулировал следующие утверждения (постулаты):

1. Энергия мира постоянна.
2. Энтропия мира стремится к максимуму.

Возрастание энтропии противоречит законам механики, в которой все процессы считаются обратимыми во времени. Поскольку мера тепловой энергии, содержащейся в макроскопической системе — температура — определяется механическим движением огромного числа составляющих систему частиц, т. е. микроскопическими процессами, то был разработан аппарат статистической физики, который дал возможность связывать описания микроскопических и макроскопических состояний. При создании этого

аппарата Л. Больцман основывался на статистическом понятии вероятности, применимом к системам, состоящим из очень большого числа частиц. Больцманом было выведено следующее соотношение, связывающее энтропию системы S с ее статистическим весом W :

$$S = k \ln W,$$

где k — постоянная Больцмана. Поскольку величина W увеличивается с возрастанием «беспорядка» в системе, то согласно второму закону термодинамики система должна эволюционировать от более упорядоченного состояния к менее упорядоченному. В применении к Вселенной, если считать ее замкнутой системой, из вывода о возрастании энтропии со временем следует необходимость эволюции к хаотическому состоянию — «тепловой смерти». Такому заключению противоречит факт существования во Вселенной сложных упорядоченных структур (планет, звезд, звездных систем). В течение XIX и первой половины XX веков это противоречие разрешить не удавалось. Однако это не означает, что кинетическая теория газов неприменима в астрономии. На ее основе было решено множество проблем, касающихся физической природы небесных тел и их эволюции.

В экспериментальной физике и особенно в ее приложениях середина XIX века ознаменовалась многими достижениями, среди которых важнейшими для астрономии были изобретение фотографии и создание метода определения химического состава тел по их спектрам.

В 1838 г. Л. Дагер и Ж. Н. Ньепс обнаружили, что под воздействием света на бромистое серебро в нем происходят изменения, зависящие от силы света, что позволяет получать негативные изображения, на которых степень почернения какого-либо участка тем больше, чем больше света туда попадало. В США был разработан процесс изготовления с негативных изображений отпечатков — фотографий (1840 г.). Почти сразу после этого были получены фотоснимки Луны, затем Солнца, и вскоре фотографирование стало одним из основных методов изучения этих небесных тел.

Фотографирование звездного неба началось позже, так как ахроматические объективы использовавшихся в 40 – 50-е годы телескопов были приспособлены для наблюдений в визуальной области спектра, а в той области, где чувствительность фотоматериалов наибольшая, изображения получались нечеткими. Лишь после усовершенствования оптики объективов и качества фотоматериалов (использования сухих пластинок) в начале 70-х годов фотографирование звездного неба астрономами стало широко применяться. В 1872 г. Г. Дрепером (США) впервые был сфотографирован спектр звезды (α Лyr).

Метод спектрального анализа разработали германские ученые Густав Кирхгоф (1824–1887) и Роберт Бунзен (1811–1899). Ими были произведены эксперименты для изучения того, как влияет на вид спектра солнечного

излучения поглощение его слоем газа (паров натрия), помещенным на пути света к наблюдателю. Излучение от такого слоя должно само по себе приводить к появлению в наблюдаемом спектре яркой линии, и поэтому ожидалось усиление яркости в том месте, где находится фраунгоферова линия, по длине волны соответствующая натриевой. Однако вместо увеличения яркости наблюдалось дополнительное потемнение в рассматриваемой линии. Это означало, что при пропускании излучения от источника сквозь слой газа в спектре этого источника образуются темные линии. Такие линии появляются вследствие частичного поглощения света на данной длине волны. Они были названы линиями поглощения (абсорбционными). Наблюдаемые в спектре Солнца фраунгоферовы линии представляют собой абсорбционные линии, возникающие из-за поглощения света разными элементами, содержащимися во внешних областях Солнца. При дальнейших экспериментах оказалось, что 70 из наблюдаемых фраунгоферовых линий образованы вследствие поглощения излучения парами железа. Путем изучения положений нескольких тысяч ярких линий, образуемых парами различных химических элементов, и сравнения их с положениями фраунгоферовых линий было установлено присутствие во внешних областях Солнца десятков элементов.

В результате исследований процессов поглощения и излучения газа Кирхгоф установил, что оптические свойства газа — поглощение и излучение света с длиной волны λ (описываемые коэффициентами излучения ε_λ и поглощения α_λ) — связаны между собой и отношение ε_λ к α_λ является универсальной функцией $B_\lambda(T)$ температуры среды, то есть имеет место следующая зависимость:

$$\frac{\varepsilon_\lambda}{\alpha_\lambda} = B_\lambda(T).$$

Кирхгоф использовал свою шкалу длин волн λ , а применяемая в настоящее время шкала была введена шведским физиком А. Онгстремом в 1868 г. ($1\text{Å} = 10^{-8}$ см).

В 1860 г. вышла в свет книга Кирхгофа и Бунзена «Химический анализ путем спектральных наблюдений», содержащая описание методики изучения спектров и полученные при таких исследованиях результаты. Методы спектрального анализа легли в основу исследований не только химического состава небесных тел, но — главным образом — их физического состояния и свойств. Эти исследования положили начало новому разделу астрономии — астрофизике.

Новые возможности для астрономии возникли благодаря так называемому «принципу Доплера» (Х. Доплер (1803–1853) — австрийский физик), изучавшего свойства волн, исходящих от движущегося по отношению к наблюдателю источника. Им было обнаружено, что смещение частоты

излучаемых волн пропорционально скорости движения источника. По смещению частоты линий в спектре движущегося объекта по отношению к частоте, определяемой в лаборатории, находится проекция скорости объекта на луч зрения.

Для освоения астрономами достижений физики потребовалось некоторое время. Достаточно широко они стали использоваться только с 60-х годов. До этого в большинстве астрономических обсерваторий продолжались исследования по разделам «классической астрономии», в основном относившиеся к Солнечной системе. Однако проводились работы и более широкого плана. В Боннской обсерватории (Германия) ее директор Фридрих Аргеландер (1799–1875), бывший одно время сотрудником Бесселя, предпринял составление каталога, включавшего помимо координат звезд также оценки их звездных величин (в шкале, несколько отличавшейся от принятой по Погсону, в которой различию на пять величин соответствовало различие в освещенности в 100 раз). Продолжавшаяся в течение семи лет работа над составлением каталога была закончена в 1859 г. В каталог было включено 324 000 звезд, звездная величина которых была не более $9^m.5$. Погрешности координат были небольшими — $1^s \div 2^s$ по α и $0''.1 \div 0''.2$ — по δ . В течение десятилетий этот каталог, названный «Боннским обозрением» (*“Bonner Durchmusterung”*), широко использовался в различных астрономических исследованиях. Включение в каталог данных о звездной величине позволяло использовать его при изучении распределения звезд в пространстве статистическими методами, т. е. для решения задач звездной астрономии. На основе «Боннского обозрения» был составлен «Атлас звездного неба». В дальнейшем каталог был расширен путем включения в него звезд южной полусферы с $\delta > -24^\circ$. В 1885 г. в Кордовской обсерватории (Аргентина) началась каталогизация звезд южного неба, закончившаяся только в 1930 г.

С 1838 г. Аргеландер начал систематические наблюдения переменных звезд по разработанному им методу глазомерных оценок блеска. При этих исследованиях, продолжавшихся им вместе с учениками более тридцати лет, было открыто много переменных звезд.

При достигнутой к середине XIX века точности астрономических наблюдений стало необходимым уточнение параллакса Солнца. Для этого использовались как наблюдения Марса в противостояниях, так и традиционный способ определения π_\odot по наблюдениям прохождения Венеры по диску Солнца. Однако существенного уточнения величины π_\odot этими способами достичь не удавалось, и поэтому был применен другой способ — наблюдения параллаксов малых планет (астероидов) в момент наибольшего приближения к Земле. Зная их орбиту (рассчитанную при условии, что среднее расстояние от Земли до Солнца равно единице), нетрудно найти и параллакс Солнца. К 1870 г., используя Берлинскую карту, открыли более

100 малых планет, а с 1890 по 1900 год, благодаря применению в наблюдениях фотографических методов, их стало известно около 450. Наиболее точные данные о величине π_{\odot} были получены по наблюдениям астероида Эрос, подходившего к Земле на малое расстояние и удобного для наблюдений как точечный источник излучения. В 1900–1901 гг., когда Эрос подошел к Земле на расстояние 0.27 а. е., было получено значение параллакса Солнца $\pi_{\odot} = 8''.807 \pm 0''.003$. Использование более точных значений расстояний в Солнечной системе позволило уточнить и другие параметры содержащихся в ней тел — их массы и размеры.

В 50-е – 60-е годы было определено значение годичного параллакса для многих как ярких, так и слабых звезд, распределенных по всей небесной сфере (главным образом в Йельской (США) и Капской (Южная Африка) обсерваториях). Результаты этих определений показали, что светимости звезд могут различаться в сотни и тысячи раз.

Леверье, ставшим директором Парижской обсерватории, в итоге трудов, выполненных после открытия Нептуна, были составлены очень точные таблицы движения всех больших планет. В большинстве своем они согласовывались с наблюдениями — различие в положениях не превосходило нескольких секунд. Однако для долготы перигелия Меркурия не удалось получить удовлетворительного согласия между наблюдениями и расчетами. Оставалась также некоторая их несогласованность для Венеры и Марса.

Американский астроном Саймон Ньюком, выполнивший работу по уточнению результатов предшествующих расчетов движения Венеры и Марса, смог уменьшить несогласованность теории и наблюдений для этих планет до допустимого предела $2''$. Все же отклонение перигелия Меркурия, составляющее около $40''$ за 100 лет, в рамках существовавшей тогда теории осталось необъясненным до XX века.

В середине XIX века оживился интерес наблюдателей к изучению метеорных потоков. Периодичность появления потоков и вычисленные орбиты, оказавшиеся параболическими, привели к выводу об их близком родстве с кометами. Метеорные «дожди» могут возникать вследствие распада ядра кометы на множество мелких частиц.

Изучение Солнца до середины XIX века ограничивалось определением его размеров и массы. Физическая природа Солнца оставалась загадочной даже для Гершеля, который считал Солнце «темным шаром», а его свет — исходящим от расположенного снаружи «огненного океана». Представление о «темном» теле Солнца удерживалось до 70-х годов и исследования ограничивались более или менее точным описанием различных видимых на солнечной поверхности образований. Систематическое наблюдение одних из наиболее известных образований — солнечных пятен — было начато в 1826 г. Г. С. Швабе (Германия) и продолжалось до 1843 г. При этом была

отмечена закономерность в появлении пятен — годы, когда их много, сменяются приблизительно через десять лет периодами, в которые их появляется мало. В 1852 г. Рудольф Вольф, анализируя большой объем наблюдательных данных о пятнах, нашел, что периодичность пятнообразовательной деятельности составляет $11\frac{1}{2}$ лет. В 1857 г. было обнаружено, что магнитное поле Земли меняется приблизительно с тем же периодом, как и частота и сила полярных сияний. Тем самым было установлено, что кроме гравитационного действия Солнца на Землю, существует зависимость сложных физических процессов на Земле от явлений, происходящих на Солнце, в частности, от присутствия солнечных пятен.

По смещениям солнечных пятен еще в начале XVIII века было обнаружено вращение Солнца вокруг оси. В 50 – 60-е годы XIX века Р. Керрингтон нашел, что скорость его вращения на экваторе больше, чем на высоких широтах — для широты 45° различие периодов составляет 2.5 суток. Помимо этого было замечено (Г. Ф. Шпёер), что в годы максимумов пятнообразовательной деятельности пятна появляются в основном на высоких широтах ($\approx 25^\circ$), затем широта их появления уменьшается и вблизи экватора они исчезают, тогда как на высоких широтах возникают пятна нового цикла.

Протуберанцы и солнечная корона наблюдались во время солнечных затмений и считались явлениями, происходящими в земной атмосфере. Их связь с Солнцем удалось доказать лишь в 1851 г.

Проблема источников излучаемой Солнцем энергии возникла после того, как был установлен закон сохранения энергии. Гипотеза Майера (1848 г.) о превращении кинетической энергии падающих на Солнце метеоритов в тепловую как источнике нагрева его поверхности не выдержала критики, будучи в количественном отношении несостоятельной. Более перспективным было высказанное Гельмгольцем предположение о том, что Солнце сжимается и освобождающаяся при этом потенциальная энергия переходит в тепловую. Эта гипотеза, количественно разработанная Кельвином, хотя и приводила к гораздо большей энергии, чем могли бы дать падающие метеориты, но все же была недостаточной для объяснения той продолжительности свечения Солнца, которая определялась данными геологии.

Чисто астрофизические исследования небесных тел начались с измерения световых потоков — фотометрии. В конструкции первого звездного фотометра, изобретенного И. К. Цёлльнером (1834–1882) в 1861 г., использовано явление поляризации света. Посредством призмы Волластона (николь) свет может быть поляризован, из потока неполяризованного излучения николю выделяет только ту часть, которая соответствует поляризованному излучению. В фотометре Цёлльнера имелся искусственный источник, поток излучения от которого регулировался двумя николями. Один из них поляризует свет, а другой расположен почти перпендикулярно первому и

пропускает очень малую долю потока, прошедшего через первый. Поэтому оказывается возможным сравнение света от искусственного источника со слабым светом небесных объектов, в частности планет.

С использованием этого фотометра в 1862–1864 гг. были определены величины альбедо A планет, приводимые ниже:

Планета	Меркурий	Венера	Марс	Юпитер	Сатурн	Уран	Нептун
A	0.07	0.59	0.27	0.62	0.50	0.64	0.4

Отражательная способность больших планет значительная и приблизительно одинакова, что свидетельствует о сходстве их строения. По видимому они состоят в основном из газа и характеризуются малым значением средней плотности $\bar{\rho}$ этих планет. У Юпитера и Урана $\bar{\rho} = 1.3 \text{ г/см}^3$, у Сатурна $\bar{\rho} = 0.7 \text{ г/см}^3$ и у Нептуна $\bar{\rho} = 1.6 \text{ г/см}^3$, тогда как у Меркурия, Венеры, Марса значение $\bar{\rho}$ равно соответственно 3.8, 4.9, 4.0 г/см^3 , т. е. близко к плотности Земли (5.5 г/см^3). Высокая отражательная способность Венеры обусловлена наличием мощного облачного слоя в ее атмосфере.

Яркость Солнца по определению Цёлльнера в 618 000 раз превышает яркость Луны, а альбедо Луны равно 0.17, что соответствует отражательной способности горных пород. Цёлльнер составил каталог звездных величин, в который включено 226 звезд.

Применение спектрального анализа к звездам было начато работами Анджело Секки (Ватиканская обсерватория) и Уильяма Хаггинса (Англия, частная обсерватория). Секки нашел, что в спектрах звезд, как и в спектре Солнца присутствуют линии поглощения, создаваемые водородом, натрием, кальцием, магнием, железом. Изучив в 1863–1868 гг. спектры около 4000 звезд, он выделил четыре типа спектров, причем звезды этих типов различаются и по цвету:

1. Белые или голубовато-белые; в спектре выделяются четыре сильные линии, принадлежащие водороду.
2. Желтые — спектр такой же, как у Солнца.
3. Красные — в спектре темные полосы.
4. Очень красные — в спектре очень темные полосы.

Разделение звезд на типы, сделанное Секки, было первой спектральной классификацией.

У некоторых звезд — например у $\gamma \text{ Cas}$ в спектре были обнаружены яркие (эмиссионные) линии. Подобная особенность была замечена и у звезды, вспыхнувшей в 1866 г. (Новая в созвездии Северная Корона). Хаггинс, получивший в 1864 г. спектр планетарной туманности, обнаружил в нем только яркие линии.

Спектральные наблюдения Солнца (1868 г.) П. Жансеном (сначала во время затмений) показали, что в спектре протуберанцев доминирует несколько эмиссионных линий, две из которых принадлежат водороду. Таким образом было установлено, что протуберанцы представляют собой облака светящегося газа. Впоследствии П. Жансеном и Дж. Н. Локьером протуберанцы наблюдались и вне затмений.

Одну из сильных линий в спектре Солнца не смогли обнаружить в лабораторных спектрах какого-либо из известных элементов и ее стали относить к гипотетическому элементу, названному гелием. Во время затмения 1870 г. в спектре солнечной короны была обнаружена еще одна эмиссионная линия, которую не могли отождествить с какой-либо линией в спектрах известных в то время элементов. Ее также приписали неизвестному элементу, названному коронием.

В начале 70-х годов спектрограф соединили с фотографирующим устройством и изучение спектров небесных тел вышло на более высокий уровень.

Лекция XV

Астрономия в последней трети XIX века

Прогресс физики — как экспериментальной, так и теоретической — в последней трети XIX века сильно сказался на развитии астрономии. Проблемы классической астрономии, относившиеся главным образом к изучению Солнечной системы, в большинстве своем представлялись так или иначе решенными, и астрофизика стала занимать в астрономии лидирующее положение. Крупные обсерватории, построенные в 70 – 90-х годах, были по своей направленности и оборудованию астрофизическими. Среди них быстро приобрели широкую известность обсерватории: в Арчетри (Италия, 1872 г.), специализировавшаяся на исследованиях Солнца, Потсдамская (Германия, 1874 г.), где проводились главным образом фотометрические и спектроскопические исследования звезд, Ликская (США, Калифорния, 1878 г.), Йерксская (США, Чикагский университет, 1897 г.). Последние две строились на пожертвованные капиталистами-меценатами средства и названы их именами. В Ликской обсерватории был установлен телескоп с объективом диаметром 36 дюймов (90 см), в Йерксской — телескоп с предельно большим для рефракторов объективом в 1 м, в Потсдаме размер объектива телескопа составлял 80 см. Они использовались для фотометрических и спектроскопических работ. В уже существовавших обсерваториях — Гарвардской и Пулковской — также проводилась фотометрия и спектроскопия звезд. Гарвардская обсерватория организовала свой филиал (станцию) в Южном полушарии (Анды) для наблюдений звезд южного неба.

Из теории электромагнитного поля, разработанной Дж. К. Максвеллом, следовало, что электромагнитные волны переносят энергию. Свет имеет волновую природу, причем длины волн, воспринимаемых человеческим глазом (оптическое излучение), находятся в интервале приблизительно от 3500 \AA до 6600 \AA . Для того, чтобы детектировать излучение на других

длинах волн, необходима специальная аппаратура. Из теории Максвелла следовало, что электромагнитные колебания могут иметь любую частоту (она обратна длине волны), но подавляющее большинство астрономов XIX века не предполагало, что небесные тела способны излучать энергию вне диапазона длин волн, воспринимаемых глазом. Кроме этого, если бы об излучении небесных светил на других длинах волн и было бы известно, то оно не могло наблюдаться из-за отсутствия соответствующих приемников излучения, а также потому, что земная атмосфера практически непрозрачна для излучения с длинами волн вне пределов оптического диапазона. В 1898 г. было открыто рентгеновское излучение, но для астрономии это прошло незамеченным, как и генерация электромагнитных волн с большой длиной волны (сантиметры) Г. Герцем.

Большое значение в астрофизике приобрели установленные в физике законы излучения, определенные путем введения понятия идеального поглотителя электромагнитных волн — «абсолютно черного тела». Зависимость полной излучательной способности E абсолютно черного тела от его температуры T была выведена теоретически Л. Больцманом, подтверждена экспериментами чешского физика Й. Стефана (1879 г.) и поэтому она носит название «закон Стефана-Больцмана». Эта зависимость выражается соотношением:

$$E = \sigma T^4.$$

В применении к излучению звезд оно дало возможность оценки температуры их «поверхностей». Конечно, для его применения необходимо считать, что излучение звезды приблизительно соответствует чернотельному. Так как звезды состоят из газа, то способность поглощать падающее на их поверхность излучение велика и указанное предположение оправдывается.

При дальнейшем изучении свойств абсолютно черного тела физиком В. Вином была найдена зависимость длины волны λ_{max} , на которую приходится максимум в спектре излучения абсолютно черного тела, имеющего температуру T :

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T}.$$

Закон Вина дает возможность по цвету звезды грубо оценить ее температуру, так как цвет в сильной мере определяется значением λ_{max} .

Одним из важнейших для дальнейшего развития физики и астрофизики результатов было определение (1900 г.) Максом Планком (1858–1947) зависимости интенсивности $B_\nu(t)$ излучения абсолютно черного тела от частоты ν и температуры:

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1},$$

Величина h называется постоянной Планка. Планком было установлено, что энергия электромагнитных волн излучается отдельными порциями — квантами. Вскоре А. Эйнштейн подтвердил этот вывод (1904 г.) и ввел понятие фотона — частицы, импульс которой равен $\frac{h\nu}{c}$.

Центрами фотометрических наблюдений были Гарвардская и Потсдамская обсерватории. В Гарвардской обсерватории использовался поляризационный фотометр, сконструированный ее директором Э. Пиккерингом (1846–1919). За стандарт была принята Полярная звезда, о переменности блеска которой в то время не подозревали. Наблюдениями на Южной станции были охвачены и звезды южного неба. В 1884 г. был издан первый фотометрический каталог, содержащий 4260 звезд до шестой величины. Второй каталог, включавший звезды до девятой величины, был закончен к 1890 г. Погрешность определений блеска несколько превышала $0^m.1$. Более точными оказались результаты определения звездных величин, производившегося в Потсдамской обсерватории при посредстве фотометров Цёлльнера — их погрешность была около $0^m.07$. Одновременно там производились наблюдения цветов звезд (колориметрические), для чего был сконструирован специальный прибор.

Фотографические методы определения блеска начали применяться в 80-е годы. В 1899 г. И. Гартманом был изготовлен микрофотометр для измерения степени почернения фотопластинки под действием света от звезды и нахождения по ней звездной величины. В том же году Карл Шварцшильд (1873–1916) стал использовать для фотометрии экстрафокальные снимки звезд. При этом необходимо было учитывать различие между фотопластинками и человеческим глазом в отношении чувствительности к длине волны излучения — для пластинок она максимальна в синей области спектра, а для глаза — в зеленой. Поэтому была введена шкала фотографических звездных величин и понятие о показателе цвета (*colour index*), обозначаемом CI и равном разности фотографической и визуальной звездных величин — $CI = m_{ph} - m_v$. Величина CI зависит от распределения энергии в спектре звезды и, следовательно, от ее температуры. Поэтому CI можно использовать для грубой оценки температур звезд.

Спектры небесных тел содержат большую информацию не только об их химическом составе, но и о физических свойствах. Однако пока не была создана теория образования спектров, т. е. оставалась невыясненной их зависимость от физических условий, существующих в среде, где формируются как абсорбционные, так и эмиссионные линии, эта информация оставалась как бы «зашифрованной». Созданию теории предшествовало накопление наблюдательного материала по спектроскопии звезд, продолжавшееся до 20-х годов XX века. Тем не менее спектры звезд систематизировались и использовались для определения скоростей движения звезд по смещению линий на основе эффекта Доплера. Благодаря применению этой методики

были открыты спектрально-двойные звезды и изучены многие переменные звезды, включая новые.

Систематизация лабораторных спектров выявила в них ряд закономерностей, одна из которых, обнаруженная физиком Дж. Бальмером (1885 г.), выражалась в соотношении между длинами волн четырех известных тогда линий, наблюдаемых в спектре водорода как в поглощении, так и в эмиссии: если принять, что $\lambda = 3645.6 \frac{n^2}{n^2-4}$, то при $n = 3, 4, 5, 6$ получаются наблюдаемые длины волн. Вскоре оказалось, что в спектрах некоторых звезд видны также линии с длинами волн, получаемыми из указанного соотношения при $n = 7, 8, 9, \dots$. Факт такой зависимости между длинами волн линий водорода в дальнейшем приобрел важное значение в физике — он был использован для построения модели атома водорода.

Фотографирование спектров звезд, начатое Генри Дрепером в конце 70-х годов, продолжалось с целью их классификации в Гарвардской обсерватории до 1896 г. Использование призмы с малым углом отклонения, помещаемой перед объективом телескопа, дало возможность получать на одной пластинке спектры сотен звезд. Эти спектры имели малую дисперсию, но тем не менее они успешно классифицировались, и к 1890 г. был составлен каталог спектров 10 351 звезды (до 8^m и $\delta > -25^\circ$) *Henry Draper Catalogue*, обозначаемый сокращенно HD. При классификации учитывались результаты, полученные ранее Секки, но она была более детализированной. В определениях принадлежности спектров к тому или иному типу главную роль играли руководивший этой работой Э. Пиккеринг и его сотрудница Э. Д. Кеннон. Типы спектров обозначались латинскими буквами, и после ряда изменений классификация приняла существующий до сих пор вид. Спектральные классы (типы) обозначают буквами в следующей последовательности: O, B, A, F, G, K, M. Потом были добавлены классы N, S, C. Как выяснилось на основании закона Вина, параметром, от которого зависит принадлежность спектра к тому или иному классу, является температура звезды. Чем меньше температура, тем дальше звезда смещена вдоль последовательности от O, когда цвет звезд голубовато-белый, до K и M, соответствующих красным звездам.

Определение скорости движения звезд вдоль луча зрения по смещению линий в спектре было одной из основных задач наблюдателей во многих обсерваториях. В Потсдамской обсерватории эти работы были начаты Германом Фогелем (1841–1907), ставшим в 1882 г. ее директором. В этом же году он опубликовал составленный по данным визуальных наблюдений каталог спектров звезд до $7^m.5$, а в 1888 г. приступил к систематическим измерениям скоростей звезд, которые производились с небольшой погрешностью 2–3 км/с.

При аналогичных наблюдениях в Гарвардской обсерватории было замечено, что в спектрах звезд ζ UMa и β Aur линии периодически раздва-

иваются и затем сливаются. Это явление было приписано доплеровскому смещению в спектрах двух однотипных звезд при их движении вокруг общего центра масс. Затем подобное явление было замечено и у других звезд. Такие звезды были названы спектрально-двойными, так как близость компонентов друг к другу не позволяет увидеть их как два отдельных источника излучения, а факт двойственности устанавливается только по спектральным наблюдениям. К 1900 г. было обнаружено более 50 спектрально-двойных звезд. У всех периоды обращения вокруг центра масс системы не превосходили нескольких месяцев, а были и такие, у которых период равнялся нескольким суткам.

В 90-е годы при наблюдениях некоторых звезд, в частности Алголя, Фогель и его сотрудник Х. Шейнер нашли, что происходит периодическое смещение спектральных линий, но их раздвоения или линий, принадлежащих спектру другой звезды, не было замечено. Такие объекты были отнесены также к спектрально-двойным системам с сильно различающимися по яркости компонентами. Таких систем наблюдалось больше, чем систем с близкими по яркости компонентами.

Периодичность изменений блеска Алголя (обнаруженная в 1782 г. Дж. Гудрайком) и других подобных ему звезд еще ранее связывалась с затмениями яркого компонента более слабым, это указывало на малость угла между орбитальной плоскостью системы и лучом зрения. Такие системы были названы затменно-двойными.

Исследование скоростей звезд по смещениям спектральных линий активно проводилось в Пулковской обсерватории. В 1876 г. в ней была создана астрофизическая лаборатория, в программу которой входила, главным образом, фотометрия звезд. Пришедший в 1888 г. в Пулковскую обсерваторию А. А. Белопольский (1854–1934), до этого занимавшийся изучением Солнца и звезд в обсерватории Московского университета, сконструировав спектрограф, начал систематические спектральные наблюдения звезд. В 1892 г. произошла вспышка Новой в созвездии Возничего. Спектры этой Новой и их изменения со временем, в частности изменения лучевых скоростей, Белопольским были изучены в деталях. Впоследствии он исследовал изменения спектров и других новых звезд, что способствовало объяснению тогда не выясненной физической природы вспышек Новых.

Усовершенствовав спектрограф и используя 76-сантиметровый рефрактор обсерватории, Белопольский значительно повысил точность определения лучевых скоростей, но по местоположению Пулково не подходило для ставших тогда традиционными систематических наблюдений по каталогизации лучевых скоростей звезд. Поэтому Белопольский сосредоточил свое внимание на исследовании спектров избранных двойных систем и переменных звезд.

«Широкие пары», т. е. визуально-двойные системы, обнаруживали при специально организованных наблюдениях в Ликской и Йерксской обсерваториях. К концу XIX века число известных визуально-двойных систем было доведено до нескольких тысяч. Для нахождения элементов орбит затменных и двойных систем других типов, а также масс их компонентов следует определять скорости движения звезд в системе. Одним из важнейших результатов наблюдений Белопольского было открытие им периодичности смещения линий в спектре звезды δ Ser, которую тогда по характеру изменений блеска относили к двойным звездам. Аналогичные периодические изменения лучевой скорости — с тем же периодом в несколько суток, как и изменения блеска — наблюдались у звезд η Aql и ζ Gem. У всех таких звезд, названных цефеидами, форма кривой изменения лучевой скорости походит на кривую блеска, но смещенную на половину периода. В минимуме блеска скорость в направлении наблюдателя оказывается максимальной.

В Гарвардской обсерватории были открыты звезды, подобные цефеидам, но с меньшим периодом колебаний блеска (менее 1^d). Их назвали, по своему представителю, звездами типа RR Lyr. Причиной изменений блеска у этих звезд, как и у цефеид, считались затмения, т. е. их относили к затменно-двойным системам.

К 70-м годам XIX века относятся первые работы по теоретическому исследованию сферических образований, состоящих из газа, т. е., по существу, моделей звезд. При этом использовались установленные в термодинамике закономерности и закон всемирного тяготения.

Рассмотрев задачу об условиях равновесия самогравитирующего газового шара, американский физик Дж. Лейн показал (1870 г.), что оно возможно лишь в том случае, когда температура возрастает к центру шара. С возрастанием температуры и одновременно плотности газа давление внутри шара увеличивается настолько, что может противостоять весу более далеких от центра масс и обеспечить равновесие. В рассмотренной модели звезды центральная температура обратно пропорциональна радиусу шара. В качестве возможной причины, приводящей к нагреву шара, можно предполагать такой фактор, как сжатие туманности, из которой образовался газовый шар, и происходящее при этом преобразование потенциальной энергии газа в тепловую.

В 1885 г. французский математик Анри Пуанкаре (1854–1912), переформулировав соотношение, найденное ранее Клаузиусом, получил зависимость между тепловой и потенциальной энергиями в самогравитирующей стационарной системе (теорема о вириале). Физик А. Риттер (Германия, 1878 г.) на основе этой теоремы вывел критерий колебательной неустойчивости газового шара. При величине отношения теплоемкостей $\frac{C_p}{C_v} = \gamma > \frac{4}{3}$ шар оказывается устойчивым, при $\gamma < \frac{4}{3}$ — неустойчивым. Образования

сферической формы, состоящие из идеального одноатомного газа, устойчивы, так как для него $\gamma = \frac{5}{3}$. Таким образом, в 80-е годы XIX века сложились отчетливые, хотя и неполные, представления о внутренней структуре звезд, а значит и Солнца, как сферических тел, состоящих из самогравитирующего идеального газа. Что же касается источников энергии, обеспечивающих наблюдаемое стационарное (устойчивое) состояние таких шаров (звезд), то их природа выяснилась только в 30 – 40-х годах XX века.

Хотя Солнце является обычной звездой, его особенное положение по отношению к Земле обусловило и иные, чем для других звезд, методы исследований, и применение специальных инструментов. В 1891 г. американским астрономом Дж. Э. Хейлом был создан прибор, названный спектрогелиографом, с помощью которого получались снимки поверхности Солнца в интервале длин волн, соответствующем определенной спектральной линии. Для получения таких фотографий в щелевом спектрографе перед фотопластинкой устанавливалась вторая щель, выделяющая узкий участок спектра. Нужный снимок получается при синхронном перемещении одной щели по диску Солнца, а другой — по пластинке. Например, выделяются только те области поверхности Солнца, от которых исходит излучение в линии водорода. Таким путем были обнаружены различные структуры на поверхности Солнца, различающиеся по характеру исходящего от них излучения, а значит, и по физическим свойствам.

В конце 80-х годов Х. А. Роулэндом (США) был изготовлен спектрограф с дифракционной решеткой, применив который, он получил спектр Солнца для длин волн от 3000 \AA до 6900 \AA . Изображение этого спектра занимало полосу тринадцатиметровой длины и содержало более 20 000 фраунгоферовых линий. Составленный атлас спектра и каталог содержащихся в нем линий долгое время являлись материалом для работ по физике Солнца. Было установлено присутствие в атмосфере Солнца сорока химических элементов.

Изучение строения Галактики и входящих в нее звездных систем являлось, начиная с пионерских работ Гершеля, одной из основных задач астрономии. Фотографические методы позволили найти много деталей ее строения, для чего послужили сделанные Э. Барнардом (США) фотографии Млечного Пути, на которых выделялись темные туманности. Каталог туманностей Дж. Гершеля (1864 г.) содержал около 5000 объектов, а в 1888 г. в «Новом Общем Каталоге» (*New General Catalogue*, обозначается NGC) их число превысило 13 000. По фотографиям неба было открыто много рассеянных и шаровых звездных скоплений.

Изучение строения Галактики проходило по двум направлениям. С одной стороны, производились подсчеты звезд до определенной звездной величины. Бывший с 1882 г. директором Мюнхенской обсерватории Хуго Зее-

лигер (1849–1924) вывел интегральное уравнение, позволяющее определять звездную плотность по таким подсчетам. Он же показал, что при равномерном распределении звезд в отсутствие поглощения их излучения на пути к наблюдателю отношение числа звезд с величиной $m + 1$ к числу звезд со звездной величиной m должно равняться 3.98. Подсчеты же приводили к меньшей величине этого отношения — от 2.2 до 3.4. Отсюда был сделан не оправдавшийся в дальнейшем вывод об уменьшении звездной плотности с удалением от Солнца, а также заключение о наличии поглощения света звезд в пространстве. Правда, величина поглощения получилась сильно заниженной по сравнению с более поздними определениями.

Другой метод исследования структуры Галактики основывался на использовании данных о собственных движениях звезд и принадлежал голландскому астроному Я. К. Каптейну (1851–1922). Им были использованы данные каталога Брадлея в обработке Ауверса (1888 г.). По звездным величинам и собственным движениям были выведены средние параллаксы. Полученная Каптейном модель Галактики имела форму сжатого сфероида. Каптейном был также опубликован (1896–1900 гг.) каталог 454 785 звезд (до 10^m) Южного полушария по наблюдениям, выполненным за ряд лет в Капской обсерватории. Введение Каптейном понятия «статистических» (или «групповых») параллаксов, т. е. определение средних расстояний для групп звезд, оказалось весьма плодотворным для дальнейших исследований структуры Галактики.

В традиционных направлениях небесномеханических исследований в последней трети XIX века не произошло значительных перемен. Новым элементом, представляющим интерес для астрофизики, были исследования Дж. Дарвином приливной эволюции системы Земля–Луна. Дарвин показал, что под действием динамических приливов со стороны Луны вращение Земли замедляется. Вращательный момент Земли переходит частично в орбитальный момент, радиус орбиты Луны увеличивается и, соответственно, возрастает и период ее обращения вокруг Земли. Согласно расчетам Дарвина, Земля и Луна были единым вращающимся телом, которое затем вследствие неустойчивости разделилось. Исследования условий равновесия самогравитирующего вращающегося состоящего из несжимаемой жидкости тела производились еще в XVIII веке К. Маклореном и в начале XIX — К. Якоби, который установил существование последовательности равновесных трехосных эллипсоидов. А. Пуанкаре нашел, что возможна последовательность фигур равновесия грушевидной формы, ответвляющаяся от последовательности трехосных эллипсоидов. Под действием возмущения со стороны Солнца обладающее грушевидной формой тело может распасться на две части, из которых одна должна быть более массивной, чем другая. Это предположение Дарвин положил в основу гипотезы о происхождении системы Земля–Луна.

Результаты своих исследований Дарвин изложил в книге «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе» (1898 г.). Его выводы впоследствии пытались применить для объяснения происхождения двойных звезд — проблемы, и сейчас не до конца решенной.

Важные исследования в физике комет были выполнены Ф. А. Бредихиным (1831–1904), бывшим в течение нескольких лет директором Пулковской обсерватории. До этого им были организованы астрофизические наблюдения Солнца и планет в обсерватории Московского университета. Развивая идеи Бесселя об образовании кометных хвостов, он создал классификацию хвостов и механическую теорию движения частиц в них под действием отталкивающей силы, исходящей от Солнца. На основе изучения спектров головных частей комет Бредихин подтвердил и углубил ранее выдвигавшееся предположение о том, что метеорные потоки образуются вследствие распада ядер комет.

Одну из важных задач, находящихся на стыке астрометрии, небесной механики и физики планет, представляло изучение характера и причин наблюдаемого изменения широты точек земной поверхности. Эти изменения, отмеченные еще Бесселем (лекция XI), подтверждались наблюдениями С. Чандлера (США, 1885 г.), а также фиксировались и в других частях света. В 1895–1898 гг. по международному соглашению было построено пять станций вдоль параллели $39^{\circ}08'$ для систематических определений их широт посредством зенит-телескопов. Было установлено наличие кратковременных изменений широты — помимо «чандлеровского» периода, составляющего около 430 суток — связанных, по-видимому, с перемещениями больших масс в теле Земли.

Лекция XVI

Астрономия в начале XX века

Бурное развитие техники, сопровождавшее рост промышленности во многих странах, в первую очередь в западноевропейских государствах, США и России, проходило в обстановке подготовки к войне. Государственная поддержка оказывалась прежде всего тем областям науки, которые могли быть наиболее эффективными для гонки вооружений: гидродинамике — в связи со строительством военных кораблей, аэродинамике — для постройки военных самолетов, радиотехнике — для связи в военное время. Однако поступательное движение фундаментальных наук не останавливалось. Годы, предшествовавшие Первой мировой войне, ознаменовались крупными достижениями в физике.

В 1897 г. был открыт электрон. После того как опыт Майкельсона опроверг гипотезу о существовании эфира и было доказано, что скорость распространения электромагнитных волн является предельной для любых взаимодействий, специальная теория относительности, созданная трудами Хендрика Антона Лоренца (1853–1928), Анри Пуанкаре (1854–1912), Альберта Эйнштейна (1879–1955) и Германа Минковского (1861–1909), как одна из основ физики утвердилась. Важнейшим выводом из этой теории является эквивалентность массы (m) и энергии (E), выражаемая соотношением Эйнштейна

$$E = mc^2.$$

Имел место значительный прогресс в понимании строения атома. Развитие атомной физики началось с работ Эрнеста Резерфорда (1871–1937), который на основе своих опытов предложил модель атома. Вокруг положительно заряженного ядра по орбитам движутся электроны, имеющие отрицательный заряд. Нильс Бор (1885–1962) усовершенствовал эту модель, приняв во внимание дискретную структуру наблюдаемого спектра атома водорода и других элементов, предполагая, что при движении во-

круг ядра атома электрон может обладать только определенной энергией и должен находиться на соответствующей ей орбите. В обычном состоянии атома электрон находится на орбите с минимальной энергией. Если же энергия движения электрона больше, чем минимальная, то неизбежен его переход «вниз» — на орбиту с меньшей энергией, сопровождаемый излучением фотона с энергией, равной разности энергий электрона. В атоме имеется дискретное множество орбит и этим объясняется дискретность наблюдаемого спектра излучения.

Модель атома Бора, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными, противоречила положениям электродинамики о том, что электрон, двигаясь с ускорением — а движение по орбите является таковым — должен непрерывно терять энергию. Это противоречие удалось разрешить лишь в рамках квантовой механики, созданной через десять лет.

Важные для многих областей науки и в частности для астрономии исследования проводились в конце XIX — начале XX века в механике. В работах А. Пуанкаре, А. М. Ляпунова (1857–1918), Джеймса Джинса (1877–1946) рассматривались сложные проблемы устойчивости физических систем, находились критерии устойчивости и исследовалась возможная эволюция системы после потери ею устойчивости. Среди процессов, связанных с неустойчивостью, изучались турбулентность и конвекция в жидкой среде. Как выяснилось впоследствии, эти виды неустойчивости характерны и для астрономических объектов. У некоторых из них было обнаружено магнитное поле. Для определения величины и направления поля используют явление расщепления линий в спектре источника излучения («эффект Зеемана»), открытое в 1896 году.

Одной из вершин, достигнутых естествознанием в XX веке, явилось создание Эйнштейном (1915 г.) общей теории относительности, являющейся, по существу, теорией гравитации. На ее основе стала развиваться космология, правильность положений которой может быть установлена только путем астрономических наблюдений.

История астрономии показывает, что для прогресса этой науки прежде всего необходимо совершенствование наблюдательной техники — телескопов и светоприемников. К концу XIX века выяснилось, что увеличение диаметра объектива рефрактора свыше одного метра по техническим причинам недостижимо. Для строительства телескопов-рефлекторов такого ограничения не существует. Поэтому в обсерватории Маунт Вилсон (Калифорния), строительство которой началось в 1904 г., был установлен (1908 г.) большой телескоп-рефлектор с зеркалом диаметром 150 см (не очень удобный в эксплуатации) и был заказан еще больший — с зеркалом диаметром 250 см (рис. 39). До этого был построен 20-метровый башенный

Рис. 39. 100-дюймовый (2.6 м) телескоп обсерватории Маунт-Вилсон.

солнечный телескоп с 10-метровым спектрографом (рис. 40), позволявшим получать спектры с большой дисперсией, поскольку первоначально обсерватория строилась как солнечная.

Рис. 40. Башенный солнечный телескоп обсерватории Маунт-Вилсон.

Вместе со строительством столь крупной обсерватории возник ряд университетских обсерваторий и небольших частных — в Нице (Франция), Симеизе (Крым), Казани (Энгельгардтовская обсерватория), обсерватория Дж. Н. Локьера (Англия) и другие.

Важным новшеством в технике астрономических наблюдений было использование фотоэлементов. В 1913 г. Дж. Стеббинс (США) применял селеновый элемент, а в Германии в это же время производились эксперименты с фотоэлементами с внешним фотоэффектом. Улучшение техники спектроскопии дало возможность получения важных наблюдательных результатов. Впервые были получены наблюдательные свидетельства существования межзвездной среды. В спектре двойной системы δ Ori линии периодически смещались вследствие орбитального движения звезд, но две линии поглощения, принадлежащие ионизованным атомам кальция, такого смещения не показывали (1904 г.). В 1919 г. в спектрах двойных систем были обнаружены неподвижные линии Na, Ca, K и полосы CN и CH. Несмещающиеся линии, не связанные со звездами двойной системы, должны принадлежать межзвездному газу.

Определение параллаксов звезд фотографическим путем началось в конце XIX века. В XX веке параллаксы определялись, как правило, по смещению изображения данной звезды на фотопластинке относительно изображений более слабых звезд, по предположению более далеких. Начиная с 1903 г. в Йерксской обсерватории этим методом после его усовершенствования нашли параллаксы многих звезд, а затем он применялся и в других обсерваториях. В результате для большого числа звезд стала известной их абсолютная величина M , т. е. та звездная величина, которую звезда имела бы, находясь на расстоянии 10 парсек, соответствующем значению параллакса $0''.1$.

Занимавшийся этой работой американский астроном Генри Норрис Рессел (1877–1957) в 1910 г. заметил корреляцию между спектральным классом звезды и ее светимостью (абсолютной звездной величиной). В 1905 г. к схожему выводу пришел датский астроном Эйнар Герцшпрунг (1873–1967), основываясь на обнаруженных в 1897 г. в Гарвардской обсерватории различиях в ширине спектральных линий у звезд, относящихся к одному и тому же спектральному классу. Используя данные о собственных движениях звезд, Герцшпрунг показал, что статистически у звезд с узкими линиями светимость больше, чем у звезд с широкими линиями. Таким путем было установлено существование двух разных последовательностей звезд одно-

го и того же спектрального класса или, что то же самое, звезд с одним и тем же показателем цвета. Герцшпрунг построил диаграмму (m ; CI) для звездных скоплений Плеяды и Гиады. Так как для звезд скопления можно принять, что все они находятся на одном и то же расстоянии от Солнца, то диаграмма (m ; CI) представляет собой сдвинутую диаграмму (M ; CI) или (M ; спектральный класс). Герцшпрунг опубликовал свою работу в малоизвестном астрономам журнале, и она оставалась для них неизвестной в течение нескольких лет. Такую же зависимость между M и спектральным классом получил Рессел в 1913 г., нанеся на координатную плоскость (спектральный тип; M) точки, соответствующие звездам. Она названа диаграммой Герцшпрунга–Рессела (диаграмма Г–Р, рис. 41). Диагональная полоса

Рис. 41. Распределение звезд на плоскости «абсолютная величина – спектральный класс» — диаграмма Герцшпрунга–Рессела.

была названа «главной последовательностью», располагающаяся над ней горизонтально совокупность звезд — «ветвью гигантов». Изолированно в левом углу диаграммы расположена звезда ε Eri, которая тогда представлялась аномалией. Вскоре в ту же область попал еще один объект — спутник Сириуса. Эти звезды получили название «белые карлики» — за свой цвет и малую светимость. При очень малом размере такая звезда имеет массу порядка солнечной.

Рессел считал, что наблюдаемое распределение звезд обусловлено их эволюцией. Хотя предложенная им концепция звездной эволюции была отвергнута в связи с результатами более поздних работ, огромное значение диаграммы Г–Р для понимания эволюции звезд было подтверждено дальнейшим развитием астрономии. По мере накопления данных о параллаксах звезд диаграмма Г–Р постепенно заполнялась звездами с известной абсолютной величиной. Для нахождения параллаксов У. С. Адамсом и А. Кольшюттером (США) был разработан (1914 г.) метод, основанный на обнаруженной ими зависимости между интенсивностью («силой») спектральных линий, принадлежащих металлам, и абсолютной величиной звезды. Этим методом «спектральных параллаксов» было получено значение абсолютной величины для нескольких тысяч звезд.

Другое крупное открытие, сильно повлиявшее на исследования по звездной астрономии, относится к цефеидам. В Гарвардской обсерватории при изучении переменных звезд в Малом Магеллановом Облаке (ММО) было замечено (Х. С. Ливитт, 1912 г.), что между длиной периода P и средней (между максимальной и минимальной) звездной величиной m существует тесная корреляция вида

$$m = \lg P + a.$$

Поскольку расстояние ММО от Солнца очень велико, то, учитывая, что $M - m = 5 \lg r + 5$, можно заключить, что соотношение между M и P

имеет тот же вид (при другом значении постоянной a). Поэтому возможно определение расстояния до звезды по величине ее периода, если известен нуль-пункт зависимости (постоянная a).

Харлоу Шепли (1885–1972), приводя множество веских аргументов против гипотезы об двойственности цефеид, утверждал, что они являются одиночными звездами. Для нахождения нуль-пункта зависимости между M и P он применил статистический метод, используя наблюдательные данные о собственных движениях ярких цефеид и результаты измерений их лучевых скоростей по смещениям спектральных линий. В большой совокупности звезд их лучевая и тангенциальная скорости должны быть в среднем одинаковыми — из этого условия определяется статистический параллакс. При известном нуль-пункте может быть определено расстояние до любой звездной системы, в которой наблюдается хотя бы одна цефеида.

Так как для звезд типа RR Lyr, содержащихся в шаровых скоплениях, существует подобная же зависимость между m и P , как и для классических цефеид, то Шепли определил расстояния до ближайших шаровых скоплений, прокалибровав их по ярчайшим звездам. Кроме того, по размерам и величине интегрального блеска Шепли определил размеры системы шаровых скоплений (предполагая ее сферической) и тем самым оценил размеры Галактики. По его данным (1917 г.) Галактика имеет линзовидную форму, ее диаметр в плоскости Млечного Пути приблизительно равен 100 000 пк, толщина — 10 000 пк, а Солнце находится на расстоянии от центра, равном 15 000 пк. Эти выводы стали предметом дискуссий, так как многие астрономы придерживались другой модели Галактики, полученной на основе подсчетов звезд. Бесспорные заключения относительно структуры Галактики были сделаны лишь в 30-е годы, когда выяснилось, что при определении расстояний по фотометрическим данным следует учитывать поглощение света в межзвездном пространстве.

Изучая кинематику звезд в Галактике, Я. Каптейн обнаружил (1904 г.) асимметрию их движений — существовало два преимущественных направления скорости, тогда как до этого предполагалось случайное распределение. В качестве альтернативы предположению о «двух потоках» К. Шварцшильдом в 1907 г. была выдвинута гипотеза об эллипсоидальности распределения скоростей звезд.

Еще в XIX веке существовало разногласие по поводу принадлежности нашей Галактике туманностей, в которых не видны звезды. Многие из астрономов считали, что некоторые из них, например туманность М31 в созвездии Андромеды, являются объектами, расположенными вне Галактики («островные Вселенные»). Эта точка зрения получила подтверждение после того, как в М31 и некоторых других туманностях удалось наблюдать вспышки новых звезд (1917–1918 гг.). Так как по наблюдениям галактических новых было известно, что при вспышках в максимуме блеска дости-

гается приблизительно одинаковая звездная величина (ее можно принять за стандарт), то по определениям звездной величины новых звезд были найдены расстояния до других туманностей и установлено, что они действительно являются внегалактическими объектами — галактиками.

При дальнейших наблюдениях выяснилось, что распределение галактик по небесной сфере анизотропно. Они почти не наблюдаются вблизи плоскости Млечного Пути, а с приближением к полюсам Галактики их число (на единицу площади небесной сферы) возрастает. Указанную особенность удалось объяснить после того, как Г. Кертисс (США) обнаружил в плоскости Млечного Пути темную полосу, состоящую из поглощающего свет вещества (1920 г.).

Видимых смещений внегалактических туманностей по небесной сфере не было замечено, что указывало на их удаленность от Галактики. Вместе с тем В. Слайфер (США) нашел, что в спектрах галактик очень велики смещения линий и, если считать их следствием эффекта Доплера, эти смещения соответствуют скорости движения вдоль луча зрения от -300 км/с (приближение к Галактике) до $+1800$ км/с (удаление от Галактики).

Результаты наблюдений звезд, Галактики и внегалактических туманностей значительно расширили область астрофизических и звездноастрономических исследований, но вместе с тем перед астрономами встал ряд новых проблем, хотя не все задачи, поставленные ранее, были решены. Одна из них состояла в выяснении природы источников энергии, излучаемой звездами.

Выводы Лейна о строении звезд, рассматривавшего их как самогравитирующие газовые системы, были обобщены физиком Р. Эмденом. В книге «Газовые шары» (1907 г.) им была изложена теория равновесия политропных газовых шаров. Использование понятия «политропа», введенного Кельвином (1862 г.), позволило обойти сложный и нерешенный вопрос об источниках энергии, поддерживающей газ в равновесии. Уравнение политропы связывает величину давления P с плотностью ρ газа. Оно имеет следующий вид:

$$P = K\rho^{1+\frac{1}{n}},$$

где n — индекс политропы, K — постоянная. Расчет структуры газового шара при использовании этого соотношения сводится к решению уравнения гидростатического равновесия, которое содержит только P и ρ . Из его решения можно также оценить величину энергии звезды и температуры в ней для разных значений n .

По представлениям, существовавшим в начале XX века, звезда является «машиной», в которой происходит преобразование энергии (неизвестного вида) в тепловую энергию, а затем в энергию излучения, выходящую из звезды в окружающее пространство. Обычно принималось, что

перенос энергии из недр звезды к ее поверхности осуществляется путем конвекции. Считая, что выработанная в звезде энергия переносится к ее поверхности излучением, К. Шварцшильд вывел уравнение переноса излучения (1906 г.). Заметим, что уравнение переноса (в интегральной форме) было получено и решено для частных случаев еще в 90-х годах XIX века О. Д. Хвольсоном (С.-Петербургский университет), но это оставалось неизвестным астрофизикам в течение шестидесяти (!) лет.

Приближенное решение уравнения переноса было осуществлено К. Шварцшильдом при условии лучистого равновесия в среде. Последнее означает, что количество энергии, поглощенной в каждом элементарном объеме, равно количеству излученной этим объемом энергии. При решении уравнения использовались простейшие предположения о характере поглощения излучения во внешних областях звезды. В результате была определена физическая структура атмосфер звезд, т. е. найдено изменение температуры и плотности газа вглубь от поверхности.

Скорость переноса энергии внутри звезды — там, где вещество непрозрачно для излучения — зависит от величины коэффициента поглощения, т. е. от степени непрозрачности. В своих исследованиях внутреннего строения звезд (1916–1917 гг.) Артур Стенли Эддингтон (1882–1944), кроме уравнения гидростатического равновесия, использовал еще и уравнение энергетического равновесия, учитывая в нем действие давления излучения. При некотором, представляющемся произвольным, предположении: произведение скорости локального энерговыделения на коэффициент непрозрачности постоянно — им была рассчитана «стандартная модель», оказавшаяся политропным шаром с индексом $n = 3$. Значение коэффициента K в уравнении политропы, вообще говоря, зависит от массы и радиуса шара, но при $n = 3$ зависимость от радиуса выпадает. В применении к Солнцу стандартная модель показывает, что давление излучения в нем по отношению к полному давлению пренебрежимо мало — его доля составляет около 0.003. С увеличением массы звезды, построенной по стандартной модели, эта доля должна возрастать и при массах, превышающих солнечную на порядок, роль давления излучения может стать преобладающей.

В изучении структуры внешних слоев Солнца и происходящих на его поверхности процессов наблюдателями были получены важные результаты. При сопоставлении лабораторных данных о спектрах различных элементов со спектрами излучения, исходящего от солнечных пятен и от свободной от пятен области поверхности Солнца, было установлено, что в пятнах температура на $1000^\circ \div 1500^\circ$ ниже, чем вне их. По величине обнаруженного Джорджем Хейлом (1868–1938) зеемановского расщепления линий в спектре излучения пятен он оценил напряженность магнитного поля в них (1908 г.). В центральной области пятна напряженность достигает нескольких тысяч Гс. На получавшихся спектрогелиограммах в пятнах

были видны вихревые движения. По наблюдениям Хейла оказалось, что в пятнах, расположенных по разные стороны от солнечного экватора, направления вращения вихрей противоположны.

Наблюдениями в обсерватории Маунт Вилсон, начавшимися в 1910 г. после окончания постройки башенного солнечного телескопа, было обнаружено, что в группах обычно имеется два «главных» пятна с противоположными полярностями магнитного поля, причем «головные» (в отношении движения по диску) пятна пар, находящихся в разных полушариях, имеют противоположные направления вращения вихрей. В 1913 г. начался новый цикл пятнообразования, и при этом полярность «головных» пятен изменилась по сравнению с предшествующим циклом. Таким образом, длительность полного цикла изменений пятнообразовательной деятельности получается равной не 11, а 22 годам.

«Зернистый» характер поверхности Солнца — грануляция — был замечен при наблюдениях П. Жансена в XIX веке. Сотрудник Пулковской обсерватории А. П. Ганский, производивший в 1905 г. на Крымской станции (в Симеизе) наблюдения Солнца, нашел, что зерно («гранула») имеет размер в несколько угловых секунд, а время жизни — 3–5 минут. Затем она распадается, и на ее месте появляется другая гранула.

Сложные явления и процессы, наблюдавшиеся на поверхности Солнца, не могли быть объяснены в начале века из-за недостаточного развития физики: наука, описывающая явления, происходящие в жидкостях и газах при наличии магнитного поля — магнитная гидродинамика — сформировалась только в 50-е годы XX века.

В решении проблемы происхождения звезд также имелся некоторый прогресс. Предположение о том, что звезды образовались путем сжатия туманностей, не было теоретически обоснованным. Джеймс Хопвуд Джинс (1877–1946), используя разработанный к началу XX века математический аппарат газовой динамики, решил указанную еще Ньютоном (см. лекцию XI) задачу о распаде газовой среды под действием гравитации на отдельные облака, из которых впоследствии могут образовываться звезды. Как им было показано (1902 г.), под действием гравитации однородная газовая среда с плотностью ρ в результате флуктуаций плотности должна распадаться на отдельные сгущения, размер которых порядка λ_J :

$$\lambda_J = \frac{\sqrt{\pi}c}{\sqrt{G\rho}}.$$

Здесь c — значение скорости распространения звука в среде. Флуктуации плотности вызываются возмущениями. Распад однородной среды происходит, если длина волны (масштаб возмущения) $\lambda > \lambda_J$. Это условие называется «критерием Джинса», а само явление распада среды на сгущения под действием тяготения — гравитационной неустойчивостью. Понятие

гравитационной неустойчивости сыграло в дальнейшем в космогонии очень важную роль. Сам Джинс, не имея точных данных о плотности среды ρ , из которой, по предположению, образовались звезды, считал, что эта величина слишком мала для того, чтобы сгущения по массе соответствовали отдельным звездам. Он предлагал модификацию идеи Ньютона, при которой в результате гравитационной неустойчивости должны были возникать не отдельные звезды, а массивные образования, потом распадавшиеся на отдельные части.

После создания Эйнштейном общей теории относительности внимание исследователей обратилось к изучению тех астрономических явлений, которые должны следовать из этой теории. Одним из таких следствий было смещение перигелия орбиты планеты в направлении ее движения, не связанное с действием других планет. Расчеты по ОТО такого смещения для Меркурия привели к величине $43''$ за 100 лет, тогда как по наблюдениям за то же время перигелий Меркурия смещался на $41'' \pm 2''$. Таким образом, наблюдения оказались полностью соответствующими теории и вместе с тем было устранено еще одно из затруднений существовавшей теории движения тел Солнечной системы.

Другим доступным в то время для наблюдений явлением было предсказываемое ОТО искривление световых лучей при их прохождении около тела достаточно большой массы, в частности вблизи Солнца. Такое искривление удалось наблюдать во время солнечного затмения в 1918 г.

Как показал К. Шварцшильд (1916 г.), в том случае, когда массу гравитирующего тела можно считать точечной, на некотором расстоянии от нее сила, действующая на пробную частицу, становится бесконечно большой. Это расстояние R_g , определяемое формулой

$$R_g = \frac{2G\mathfrak{M}}{c^2},$$

где c — скорость света, было названо «шварцшильдовским радиусом». Вывод о существовании такой величины позднее — во второй половине XX века — оказался крайне важным для понимания природы таких астрономических объектов, как пульсары и активные ядра галактик.

В классических областях астрономии продолжались работы того же характера, что и в конце XIX века. Наблюдателями было найдено, что в Солнечной системе реализуется решение ограниченной задачи трех тел. Были открыты две группы малых планет — «трояницы» и «греки». Во время своего движения планеты каждой группы остаются вблизи вершины равносоставленного треугольника, в других вершинах которого находятся Солнце и Юпитер. Среди физических исследований тел Солнечной системы видное место заняла теория диссипации планетных атмосфер, изложенная Джинсом в книге «Динамическая теория газов» (1916 г.).

В рассматриваемый период было выполнено несколько важных исследований, положивших начало новой области астрономии — звездной динамике (динамике звездных систем). В 1911 г. Пуанкаре установил условие стационарности динамической системы, содержащей большое число гравитационно взаимодействующих тел. Оно заключается в том, что функция распределения этих тел (точек) по координатам и скоростям должна зависеть от пяти постоянных — независимых интегралов движения. Использование этого утверждения при построении математического аппарата динамики звездных систем Джинсом позволило ему упростить решение задач динамики. При наличии осевой симметрии и известной зависимости плотности и потенциала от координат R и z система уравнений динамики сводится к двум уравнениям, определяющим скорости движения тел и их дисперсии.

Лекция XVII

Астрономия между мировыми войнами (1920–1940 годы)

Развитие фундаментальной науки замедлилось мировой войной, особенно в тех странах, на территории которых велись военные действия. Там же, где их не было, например в США, физики и астрономы могли продолжать свои исследования, хотя и менее интенсивно, чем раньше. Для астрофизики послевоенного периода начался процесс «разделения труда», до этого происходивший в физике. Сложность физических теорий, в которых должен использоваться мощный математический аппарат, привела к появлению теоретической физики как самостоятельного раздела науки. Вместе с тем все бóльших усилий и затрат времени требовала постановка сложных экспериментов, что привело к формированию экспериментальной физики как отдельной науки. Естественно, что обе отрасли физики развивались во взаимодействии.

Аналогичное положение сложилось в астрономии. Еще в начале XX века выделились крупные ученые-астрономы, занимавшиеся только развитием теории явлений, обнаруженных при наблюдениях. К ним относились прежде всего Джеймс Джинс, Артур Эддингтон, Э. Милн (1896–1950) в Англии, Х. Занстра (1894–1972) в Голландии, В. А. Амбарцумян (1908–1996) в СССР и другие. С другой стороны, не менее интенсивно работавшие астрономы — Дж. Хейл, Эдвин Хаббл (1889–1953) в США, Г. А. Шайн (1892–1956) в СССР — занимались в основном наблюдениями. Конечно, были и ученые, сочетавшие в себе способность к трудоемкой наблюдательной работе и к сложным расчетам. Со временем такое соединение становилось все более сложным и в 30-е годы теоретическая астрофизика выделилась как самостоятельная дисциплина, подобно небесной механике. Для объедине-

ния усилий астрономов разных стран в решении научных проблем в 1922 г. был создан Международный астрономический союз (МАС).

Интенсивность физических исследований после Первой мировой войны увеличилась как вследствие необходимости удовлетворять потребности техники, так и в силу логики развития науки. Из достижений физики этого времени наибольшее значение для астрофизики имело создание квантовой механики в 1927–1928 гг. Благодаря ей теория образования спектров небесных тел получила твердую основу, и стало возможным изучение физических свойств астрофизических объектов и процессов, происходящих в них, как в количественном, так и в качественном отношении.

Индийский физик Саха получил формулу (1920 г.), определяющую зависимость степени ионизации атомов в газе от его температуры и плотности при условии термодинамического равновесия. Так как атомы в звездных атмосферах находятся в разных состояниях ионизации и возбуждения, то, изучая линии соответствующих ионов и атомов, можно при помощи формулы Саха и формулы Больцмана, определяющих зависимость степени возбуждения атомов от температуры, исследовать физические условия в атмосферах. Таким путем в 30-х годах было получено истолкование спектральных последовательностей на диаграмме Герцшпрунга–Рессела (Г–Р). Основными параметрами, от которых зависит характер спектра звезды, являются температура и величина ускорения свободного падения на ее поверхности.

За 30-е годы были достигнуты значительные успехи в систематизации лабораторных спектров различных атомов и ионов, что облегчило идентификацию линий в наблюдаемых спектрах. Квантовомеханическими методами для многих атомов и ионов были рассчитаны вероятности переходов электронов между энергетическими уровнями, определяющие интенсивности соответствующих спектральных линий. Все это сделало анализ спектров звезд и туманностей основным источником информации о физическом состоянии внешних слоев звезд и туманностей.

Среди достижений физики в 30 – 40-е годы следует отметить открытие новых элементарных частиц — позитрона, нейтрона, μ -мезона, нейтрино и создание теории строения атомных ядер. В конце 30-х годов были произведены расчеты эффективностей различных реакций ядерного синтеза, что послужило основой для теории, объясняющей генерацию энергии в звезде.

В технике астрономических наблюдений и обработки наблюдательных данных происходили значительные перемены. В 1921 г. впервые были произведены интерферометрические измерения размера звезд. Конструировались фотоэлектрические фотометры. Совершенствовалась также измерительная техника, спектрофотометры, микрофотометры, блинк-микроскопы. В конце 30-х годов получили распространение фотоэлектри-

ческие методы в позиционной астрономии при регистрации моментов звездных прохождений через сетку нитей пассажного инструмента.

В Симеизской обсерватории (Крым) в середине 20-х годов был установлен рефлектор с зеркалом диаметром 1 м, на котором в течение 15 лет Г. А. Шайном и его сотрудниками производились спектральные наблюдения звезд. В 1939 г. закончилось строительство (на частные средства) обсерватории МакДональд (США, Техас), где был установлен телескоп с зеркалом диаметром свыше 2 м. Получение благодаря совершенствованию техники наблюдений спектрограмм звезд высокой дисперсии обеспечило проведение анализа атмосфер звезд различных классов. Помимо количественного объяснения зависимости спектрального класса от температуры звезды было показано, что разделение звезд на диаграмме Г–Р на две последовательности (гигантов и карликов) с различной плотностью и давлением в атмосферах сказывается на профилях линий поглощения. В спектрах звезд-карликов они шире, чем в спектрах гигантов.

При изучении спектров двух затменно-переменных еще в 1909 г. было заподозрено, что наблюдаемая размытость абсорбционных линий обусловлена вращением звезд. К выводу о вращении некоторых звезд в 1923 г. пришел О. Струве (США) на основании наблюдавшегося расширения профилей абсорбционных линий. Влияние вращения звезды на профили линий поглощения в ее спектре было тщательно исследовано в конце 20-х годов Шайном и О. Струве, доказавшими, что звезды — компоненты спектрально-двойных систем — обладают осевым вращением. Затем они установили, что вращаются и многие из одиночных звезд. При этом оказалось, что у звезд классов О, В, А скорость вращения на экваторе достигает 100–200 км/с, тогда как для классов G, K, M она не превосходит 50 км/с и такая скорость достигается лишь в тех случаях, когда звезда является компонентом двойной системы.

В 1926 году Эддингтоном была опубликована книга «Внутреннее строение звезд», где он подвел итоги своих многолетних исследований структуры звезд, оставив в стороне нерешенный вопрос об источниках звездной энергии. Для звезд, соответствующих стандартной модели (см. лекцию XVI), было установлено соотношение между светимостью L и массой \mathcal{M} :

$$L \propto \mathcal{M}^\alpha, \quad \text{где } \alpha \approx 3,$$

которое близко к зависимости между L и \mathcal{M} , получавшейся из наблюдений звезд, относящихся к главной последовательности на диаграмме Г–Р. Что касается звезд, расположенных на ветви гигантов, то для них подобной зависимости нет.

Массы звезд получались из наблюдений их движений в составе тесных двойных систем. Для многих звезд они были определены Г. Н. Ресселом.

Массы одиночных звезд непосредственно из наблюдений спектров оценить затруднительно.

В той же книге рассмотрены проблемы звездных пульсаций. К этому времени большинство астрономов приняло как факт, что цефеиды являются одиночными звездами, а изменения их блеска вызываются пульсациями, т. е. периодическими сжатиями и расширениями звезды. Пульсации представляют собой колебания звезды в собственном гравитационном поле и поэтому для них должно выполняться соотношение между периодом P и средней плотностью $\bar{\rho}$, установленное еще А. Риттером:

$$P\sqrt{\bar{\rho}} = C.$$

Решение уравнений газодинамики для разных моделей, проведенное Эддингтоном, показало, что значение C сильно зависит от выбора модели и для политропной модели при $n = 3$ существенно отличается от значения, находимого из наблюдений.

В действительности колебания звезды за сравнительно короткое время должны затухать вследствие диссипации энергии колебаний и испускаемого звездой излучения. Действие этих факторов было количественно исследовано Эддингтоном. У реальных цефеид затухания не наблюдается и поэтому должен существовать механизм, компенсирующий диссипацию. При изучении модели с точечным источником энергии в центре звезды Эддингтон пришел к выводу, что для компенсации потери энергии колебаний действие внутреннего источника энергии должно согласовываться с фазой пульсации. Этот вывод впоследствии был подтвержден детальными расчетами (50-е годы).

Для более полного, чем достигнутое в 20-е годы, понимания структуры атмосфер и внутреннего строения звезд и создания количественной теории было необходимо исследование процессов взаимодействия между веществом и излучением, которое стало возможным только после того, как был создан аппарат квантовой механики. При его посредстве рассчитывались процессы поглощения и излучения энергии веществом.

Одними из первых объектов, для которых происходящие в них элементарные процессы и структура были выяснены более или менее полно, стали планетарные туманности, поскольку они оказались наиболее прозрачными — в прямом и переносном смысле (их роль для развития астрофизики можно уподобить роли, которую сыграли мухи-дрозофилы в развитии генетики). Еще в XIX веке было замечено, что звезда, находящаяся в центре планетарной туманности, всегда относится к спектральному классу O. Поэтому, как выяснилось в дальнейшем, такие звезды должны иметь высокую температуру — порядка 50 000 К и более. Кроме того, в спектрах планетарных туманностей выделялись загадочные эмиссионные линии, которые не

удавалось отождествить ни с какими из линий, изучавшихся в лабораториях; соответствующий им гипотетический элемент был назван небулием. Как показал А. С. Боуэн (США, 1928 г.), две из линий небулия образуются при запрещенных переходах в дважды ионизованных атомах кислорода. Переход электрона в атоме с верхнего энергетического уровня на нижний приводит к излучению фотона с энергией, равной разности энергий верхнего и нижнего уровней. При обычных — разрешенных — переходах электрон остается на верхнем уровне около 10^{-8} с. По правилам квантовой механики переход является «запрещенным», если электрон находится в верхнем (метастабильном) состоянии в течение секунды или более, прежде чем переходит на уровень с меньшей энергией. После объяснения природы линий небулия в спектрах планетарных туманностей было установлено наличие и других запрещенных линий. Для появления в спектре запрещенных линий плотность светящегося газа должна быть достаточно малой, потому что в противном случае при столкновениях атома с электронами метастабильное состояние разрушается. По этой же причине должна быть малой и плотность излучения. Для планетарных туманностей эти требования выполняются.

Норвежский астрофизик Свен Росселанд (1894–1985) показал, что присутствие эмиссионных линий водорода в спектрах планетарных туманностей обусловлено флюоресценцией. Условием для действия флюоресцентного механизма свечения является ослабление плотности излучения в туманности по сравнению с плотностью на поверхности горячей центральной звезды. Под действием высокочастотного излучения этой звезды атомы водорода ионизируются с основного энергетического уровня, а при рекомбинациях на высшие уровни и каскадных переходов на нижние образуются фотоны меньшей энергии, чем фотоны, ионизовавшие атом. По наблюдаемым интенсивностям возникающих в этом процессе эмиссионных линий балмеровской серии (образующихся при переходах электронов с высших на второй уровень) голландский астроном Занстра определил значение температуры звезды, находящейся в центре и ионизирующей газ. Она оказалась очень высокой — 40 000 – 80 000 К. По свечению планетарных туманностей в эмиссионных линиях В. А. Амбарцумяном в 30-е годы были определены массы самих туманностей и температура излучающего газа.

Эмиссионные линии наблюдаются в спектрах звезд и других типов — у новых звезд во время вспышек, очень горячих звезд Вольфа–Райе (WR), выделенных именно по этой особенности спектра в 1867 г. Ш. Вольфом и Ж. Райе, звезд класса В и даже у звезд класса М. Поскольку наличие эмиссионных линий в спектрах планетарных туманностей было успешно объяснено действием флюоресцентного механизма, который реализуется лишь в условиях малой плотности, то был сделан вывод, что и эти звезды обладают оболочками из разреженного газа. Канадский астроном Билс по-

казал, что оболочки звезд WR образованы газом, истекающим из звезды со скоростью порядка тысячи км/с. Аналогичное положение имеет место в случае новых звезд, расширяющиеся оболочки которых образуются во время вспышек. Теория свечения оболочек новых звезд и изменения этого свечения со временем («кривой блеска») была разработана В. А. Амбарцумяном (1935 г.). Что касается звезд класса В с эмиссионными линиями в спектрах, образующихся также путем флюоресценции, то возникновение у них оболочек приписывалось американским астрономом О. Струве быстрому вращению звезд, при котором в экваториальной области под действием центробежной силы происходит истечение газа с поверхности. Истечение газа из звезд, т. е. потеря ими массы за короткое время по сравнению с продолжительностью жизни звезд, меняет их структуру. Проблема потери массы звездами стала одной из наиболее важных в физике звезд. Ей было посвящено много внимания в опубликованной в 1939 г. книге В. А. Амбарцумяна «Теоретическая астрофизика», явившейся первым учебником по этой дисциплине на русском языке.

Решение задачи о свечении звездных оболочек, необходимое для определения их физических свойств, заняло видное место в теории переноса излучения. Задача осложнялась тем, что оболочки — как и газовые туманности — не находятся в состоянии термодинамического равновесия. В 30-х годах разрабатывались различные методы ее решения, и теория лучистого равновесия оболочек позволила определять не только их структуру, но и динамику.

Занимающие особое место на диаграмме Г–Р звезды — белые карлики — еще в 20-е годы привлекли к себе внимание исключительно большой величиной средней плотности ($\bar{\rho} \gtrsim 10^6$ г/см³). Понять их природу стало возможным только после создания квантовой механики, в которой рассматривалось «вырождение» газа, наступающее, когда плотность его становится очень высокой. Астрофизик индийского происхождения Субрахманьян Чандрасекар (1910–1995), работавший тогда в Англии, предположил, что в белых карликах все электроны, оторванные от атомов, образуют вырожденный электронный газ и, используя уравнение состояния вырожденного газа, полученное на основе квантовой механики, рассчитал внутреннее строение этих звезд. Очень важным для астрофизики оказался следующий из этих расчетов вывод об ограниченности массы белых карликов ($M_{wd} < 1.46 M_{\odot}$ — «предел Чандрасекара»). При большей массе звезды сжатие под действием тяготения не уравновешивается давлением и поэтому она является неустойчивой.

В 1932 году, после открытия нейтрона, физик Л. Д. Ландау указал на возможность существования звезд, плотность в которых должна быть на несколько порядков больше, чем у белых карликов. При столь высокой плотности вещество состоит из нейтронов, поскольку электроны «вы-

нуждены» соединяться с протонами. В конце 30-х годов предполагалась возможность образования таких звезд при «коллапсе» (катастрофическом падении вещества звезды к ее центру под действием самогравитации).

Обнаружение во внегалактических туманностях вспышек, подобных вспышкам новых, но со светимостями в тысячи раз большими, послужило основанием для гипотезы о существовании сверхновых звезд (К. Лундмарк, 1919 г.). В конце 30-х годов Ф. Цвикки (США) организовал систематические наблюдения вспышек сверхновых. С 1936 по 1939 гг. было зафиксировано двенадцать вспышек. Энергия, освобождаемая при вспышке, сравнима с потенциальной энергией звезды, и, следовательно, при этом происходит разрушение всей ее структуры. Как предположили Ф. Цвикки и В. Бааде (США, 1934 г.), вспышка сверхновой связана с коллапсом звезды.

Возможность коллапса обусловлена исчерпанием источников внутренней энергии звезды. Поиски таких источников, способных поддерживать излучение звезд в течение миллиардов лет, в конце 30-х годов завершились успехом благодаря развитию теории атомных ядер. Таким источником являются термоядерные реакции превращения легких ядер в более тяжелые. Так, в центральных областях Солнца, где преобладающим элементом является водород, происходит объединение четырех протонов в ядро атома гелия. Масса четырех протонов больше, чем масса ядра гелия, поэтому при каждом таком процессе в соответствии с формулой Эйнштейна освобождается энергия, равная $(4m_p - m_{\text{He}})c^2$. Детальные расчеты, выполненные физиком Гансом Бете (1938 г.), показали, что превращение водорода в гелий в условиях, существующих в центральных областях Солнца, действительно возможно. У более массивных звезд, имеющих и большую центральную температуру, источник внутренней энергии тот же, но превращение водорода в гелий должно осуществляться более сложным путем, чем внутри Солнца.

На фоне достижений в физике звезд успехи изучения межзвездной среды в рассматриваемый период представляются скромными. До работы Эддингтона (1926 г.), теоретически обосновавшего принадлежность линий поглощения, открытых в спектрах двойных звезд, межзвездному газу, некоторые астрономы подвергали сомнению само существование межзвездного газа. По мнению Эддингтона, поглощающий газ находится не вблизи звезд, по спектрам которых он обнаруживается, а образует гигантские облака. Справедливость этой точки зрения подтвердилась наблюдаемой корреляцией между интенсивностью наблюдаемых межзвездных линий Ca^+ и расстоянием до звезды, в спектре которой эти линии видны. По наблюдениям на обсерватории Маунт Вилсон, на расстоянии по лучу зрения один кпк встречается около десяти облаков.

По характеру линий поглощения, образуемых межзвездным газом, видно, что его температура не настолько высока, чтобы водород был ионизован. Однако вблизи горячих звезд он может быть ионизован их излучением. Это приводит, как показал Б. Стрёмгрен (1939 г.), к образованию вокруг звезд классов О и В областей ионизованного водорода (зон III), имеющих размеры до нескольких десятков пк.

Наряду с исследованием поглощения света межзвездным газом, проявляющегося в образовании в спектрах звезд абсорбционных линий, продолжались поиски поглощения света звезд в непрерывном спектре, предсказанного еще В. Струве в середине XIX века. Результаты таких поисков были противоречивыми, пока в 1930 г. Р. Трюмплером (США) не было получено убедительного свидетельства поглощения света в пространстве Галактики. Изучая диаграммы Г–Р для звездных скоплений, он нашел, что для скоплений одинаковой формы и размеров расстояния, определяемые по звездным величинам самых ярких звезд, отличаются от расстояний, находимых по различию угловых диаметров скоплений. На определении видимых звездных величин поглощение света, если оно есть, должно сказываться, а угловые размеры объектов от поглощения света не зависят. На этом основании Трюмплер сделал заключение о поглощении света в пространстве и оценил его величину в $0^m.67$ на килопарсек. По наблюдениям избытка цвета звезд в скоплениях было установлено, что происходит и зависящее от длины волны (селективное) поглощение. Причина его, по исследованиям астрономов обсерватории Маунт Вилсон в 30-х годах, заключается в присутствии пылевых частиц. Они концентрируются в слое, расположенном вдоль галактической плоскости, где поглощение гораздо сильнее, чем в околополюсных областях. Поглощение пылью составляет до $2^m \div 5^m$ на килопарсек. Эффективность рассеяния и поглощения света пылинками зависит от длины волны, обуславливая, тем самым, селективность поглощения. Оценки размеров пылинок привели к величине порядка 10^{-5} см.

В середине 20-х годов был достигнут значительный прогресс в решении вопроса о структуре Галактики, стоявшего еще со времени Гершеля. По асимметрии распределения скоростей и собственных движений звезд шведский астроном Бертиль Линдبلاد (1895–1965) установил (1926 г.), что Галактика вращается вокруг оси, проходящей через центр системы, положение которого было им определено. Вслед за этим Ян Оорт (1900–1999), изучив пространственное распределение лучевых скоростей звезд в сочетании с их наблюдаемыми собственными движениями, нашел (1927 г.), что вращение Галактики дифференциальное, угловая скорость меняется с расстоянием до центра. Для окрестности Солнца скорость вращения составляет около 270 км/с. Что касается расстояния Солнца от центра Галактики, то оно оказалось значительно меньше, чем определенное ранее Шепли

(см. лекцию XVI), который не принимал во внимание межзвездное поглощение. Это поглощение сказывается на определяемых по видимым звездным величинам светимостях звезд и соответственно на оценке расстояний до них. Явление «двух потоков», открытое Каптейном, также получило объяснение как эффект, обусловленный вращением Галактики.

Кроме указанных работ по кинематике звезд и звездных систем, значительное развитие в работах Линдблада, Амбарцумяна и Чандрасекара получила динамика таких систем. Этим проблемам Чандрасекар посвятил монографию «Принципы звездной динамики» (1942 г.). Важное значение для астрономии имели расчеты времени релаксации для звездных систем различного типа. По оценке, сделанной Джинсом в предположении о равновесном распределении эксцентриситетов орбит в двойных звездных системах, возраст Галактики равен 10^{13} лет (так называемая «длинная шкала»). Амбарцумян показал (1937 г.), что равновесия в распределении эксцентриситетов не существует и возраст звезд Галактики не должен превышать 10^{10} лет («короткая шкала»). Им были также получены (1938 г.) важные для космогонии звезд выводы об эволюции звездных скоплений. Расчеты показали, что вследствие коллективных взаимодействий скопление должно релаксировать к равновесному состоянию за время порядка $3 \cdot 10^7$ лет. В равновесном состоянии скорости звезд распределены по закону Максвелла, и у некоторой доли звезд (в «хвосте» распределения) скорости превосходят параболическую. Они могут покидать скопление, при этом равновесие нарушается, но вскоре оно восстанавливается и звезды опять могут покидать скопление. Таким образом скопление за сравнительно короткий срок (по отношению к времени существования Галактики) должно разрушиться.

В обсерватории Маунт Вилсон с 20-х годов проводилось изучение как галактических, так и внегалактических туманностей. В Галактике помимо планетарных туманностей существуют и диффузные, не имеющие правильной формы. В тех случаях, когда в такой туманности (или около нее) находится звезда класса O или B, в спектре ее излучения наблюдаются эмиссионные линии, образующиеся тем же путем, что и у планетарных туманностей.

Внегалактические туманности представляют собой далекие галактики (см. лекцию XVI). Один из главных наблюдателей на 2.5-метровом телескопе, выдающийся астрофизик Эдвин Хаббл (1889–1953) классифицировал галактики по морфологическим признакам. Им были выделены (1925 г.) следующие типы галактик:

- 1) эллиптические (E);
- 2) спиральные (S), среди них обладающие перемычкой, проходящей через центр (SB);

3) иррегулярные (Ir).

В основных чертах эта классификация сохраняется до настоящего времени.

В ходе многолетних наблюдений галактик Хаббл обнаружил систематическое смещение линий в их спектрах в сторону длинных волн («красное смещение»). Если его истолковывать как результат эффекта Доплера, то это свидетельствует об удалении галактик от нашей системы, причем скорость их движения тем больше, чем дальше находится галактика. В опубликованной в 1929 г. Хабблом работе приведена диаграмма (рис. 42), демонстрирующая важнейший результат наблюдений, и сформулирован

Рис. 42. Зависимость лучевой скорости галактик от их расстояния — диаграмма Хаббла.

закон Хаббла — скорость удаления галактики прямо пропорциональна расстоянию до нее. Коэффициент пропорциональности H , выражаемый в (км/с)/Мпк, называется «постоянной Хаббла».

К 1936 г. диаграмма была дополнена еще несколькими десятками галактик, находившихся в пределах возможностей наблюдений на 2,5-метровом телескопе. В числе исследований по внегалактической астрономии, выполненных с использованием этого телескопа, следует отметить открытие скоплений галактик, которое приобрело в дальнейшем большое значение для астрономии.

Эйнштейн, основываясь на созданной им общей теории относительности, предложил модель замкнутой стационарной Вселенной. Вместе с тем В. Де Ситтер выдвинул другую модель, в которой плотность вещества считалась очень малой и предполагалось, что действуют силы отталкивания, пропорциональные расстояниям. Однако при более полном рассмотрении (1922–1923 гг.) различных моделей А. А. Фридманом (1888–1925) было показано, что стационарное состояние Вселенной невозможно. При определенных начальных условиях должно происходить расширение Вселенной. Таким образом по существу было предсказано обнаруженное затем Хабблом расширение Вселенной. Работы Фридмана не привлекли в то время внимания астрономов, и результаты Хаббла истолковывались в соответствии с моделью Ж. Леметра (Бельгия), выдвинутой в 1927 г. и близкой к модели Фридмана.

В изучении Солнечной системы за два десятилетия выдающихся событий не происходило, если не считать открытия еще одной планеты — Плутона (1930 г.) по возмущающему его действию на движение Нептуна.

В исследованиях Солнца в эти годы важным было выяснение роли конвекции в различных наблюдаемых на его поверхности явлениях. В 1905 г. К. Шварцшильд установил критерий перехода от состояния лучевого равновесия к конвективному. Исследование немецким астрономом А. Унзельдом (1905 г.р.) физических условий во внешних слоях Солнца привело к

выводу о том, что изменение непрозрачности среды с глубиной приводит к уменьшению адиабатического градиента температуры и наступлению — по критерию Шварцшильда — конвективной неустойчивости. На расстоянии в несколько сотен километров под «поверхностью» Солнца должен преобладать перенос энергии путем конвекции. Оценки скорости движения конвективных элементов (≈ 1 км/с) и времени их жизни (≈ 10 минут) близки к значениям, наблюдаемым для солнечных гранул, и поэтому явление грануляции было объяснено как следствие конвекции (Г. Зидентопф, Германия, 1933 г.).

Лекция XVIII

Астрономия после второй мировой войны — до 60-х годов

Мировая война нанесла огромный ущерб хозяйственной деятельности, культуре и науке, особенно в европейских государствах. В СССР, Германии и некоторых других странах были разрушены научные центры и крупные обсерватории: Пулковская, Симеизская, Потсдамская, Кенигсбергская. Большинство активно работавших ученых занималось решением задач, обусловленных потребностями военного времени. Исключение представляли некоторые страны — например, Швейцария и Швеция — в которых астрономические работы продолжались, главным образом по проблематике, связанной с Солнцем. Проводились наблюдения также в обсерватории в Верхнем Провансе (Франция).

Иной была обстановка в США, чья территория не была затронута военными действиями. Не говоря о физических исследованиях, которые имели оборонное значение, проводились и чисто астрономические. В обсерватории Маунт Вилсон продолжалось изучение спектров галактических туманностей и галактик, в обсерватории МакДональд наблюдались и изучались спектры нестационарных звезд, в Йерксской обсерватории разрабатывалась двумерная спектральная классификация.

После окончания войны и периода восстановления экономики началось бурное развитие фундаментальной науки в тех странах, где для этого существовали необходимые экономические и политические условия. В значительной мере этот рост происходил под влиянием того впечатления, которое формировалось вследствие успехов физики в области совершенствования военной техники и создания новых видов вооружений. Астрономия также была вовлечена в этот процесс: астрофизика — благодаря своей близости к физике, а небесная механика и астрометрия — в значительной мере

благодаря развитию ракетной техники и планировавшихся запусков искусственных спутников Земли. Изменение позиции многих правительств по отношению к развитию фундаментальной науки выразилось в системе ее финансирования и изменении системы подготовки научных кадров. Даже в США строительство обсерваторий стало государственным делом — в 1951 г. на горе Китт-Пик была основана — впервые за государственный счет — Национальная обсерватория, оборудованная крупными телескопами. Крупнейшим в мире долгое время оставался рефлектор с пятиметровым зеркалом, установленный (1949 г.) в обсерватории на горе Паломар в Калифорнии (рис. 43). В 1954 г. закончилось восстановление Пулков-

Рис. 43. Пятиметровый телескоп обсерватории Маунт-Паломар.

ской обсерватории, в основанной в Крыму астрофизической обсерватории в 1961 г. был установлен тогда крупнейший в Европе телескоп с зеркалом диаметром 2.6 м. В середине 50-х годов началось строительство радиотелескопов в СССР, Англии (см. напр. рис. 44), Австралии, США.

Рис. 44. Радиотелескоп обсерватории Джордрелл-Бэнк (Англия) с зеркалом диаметром 76 м.

Быстрое развитие астрономических исследований стимулировалось открывшимися после окончания войны возможностями использования результатов научных и технических разработок военного времени. К ним относятся:

- 1) радиотехнические методы, в первую очередь радиолокация;
- 2) совершенствование вычислительной техники, изобретение электронно-вычислительных машин;
- 3) изобретение электронно-оптических преобразователей и фотоумножителей;
- 4) совершенствование ракетной техники и использование ее для внеатмосферных наблюдений;
- 5) изучение ядерных реакций — экспериментальное в крупных лабораториях и путем расчетов;
- 6) развитие газовой динамики, исследования ударных волн;
- 7) внедрение электроники для автоматизации наблюдений и обработки наблюдательного материала.

Применение новых методов и технических средств в астрономии вызвало приход в нее специалистов, ранее не связанных с астрономией, а также

изменение направления подготовки кадров для работы в астрономии. Астрономия начала качественно изменяться в отношении «роли личности» в ней. Для подготовки наблюдений, их организации обычно нужны усилия многих специалистов — исследования производятся коллективами. Сначала это относилось только к экспериментальным работам, но с течением времени стало характерным и для теоретических исследований. Соответственно прогресс науки стал меньше зависеть от деятельности отдельных ученых, значительную роль стали играть научные школы. С развитием средств коммуникации и быстрого обмена информацией роль коллективных исследований увеличивалась, причем не только в астрономии.

Новые методы применялись главным образом в астрофизике и в меньшей степени затронули астрометрию и небесную механику. В астрометрии продолжала внедряться электроника, употреблявшаяся в наблюдениях, стали использоваться атомные часы, для вычислений применялись ЭВМ. В небесной механике помимо широкого использования ЭВМ особое внимание уделялось исследованиям движения искусственных спутников Земли. Впервые такой спутник был запущен в 1957 году в СССР.

Благодаря применению радиотехнических методов наблюдательная астрономия, вышедшая за пределы оптического диапазона по возникшему новому каналу получения информации, сильно расширила существовавшие представления о структуре Солнца, Галактики и внегалактических образований. По излучению в радиодиапазоне были открыты новые объекты, такие как квазары и пульсары. Но первые данные о космическом радиоизлучении были получены для Солнца и Галактики.

Космическое радиоизлучение было обнаружено К. Янским (США) в 1932 г. по шумовым сигналам, поступающим от источника, находившегося в направлении на центр Млечного Пути. В начале 40-х годов было установлено, что Солнце также является источником радиоизлучения. Резкое возрастание радиоизлучения (в миллион раз) обнаружили при появлении на поверхности Солнца большой вспышки английские радары (1942 г.).

Исследование радиометодами структуры Галактики оказалось возможным благодаря основополагающей работе голландского астрофизика Х. Ван де Хюлста (1921–2000), показавшего, что переход между подуровнями основного уровня атома водорода (с различными ориентациями спина электрона) приводит к излучению (или поглощению) кванта энергии на длине волны $\lambda = 21$ см, соответствующей радиодиапазону. Это излучение может детектироваться на поверхности Земли от объекта, содержащего достаточно большое количество атомов водорода в нейтральном состоянии и, следовательно, имеющего низкую температуру ($\lesssim 100$ К). Межзвездная среда принадлежит к числу таких объектов, и поэтому по наблюдениям в линии $\lambda = 21$ см можно находить распределение водорода в Галактике и

тем самым определять ее структуру. При достаточной чувствительности приемников излучения это возможно сделать и для других галактик.

В начале 40-х годов произошли радикальные изменения в представлениях о природе солнечной короны. Как было отмечено ранее (лекция XIV), в спектре Солнца помимо линий гипотетического элемента корония наблюдался еще ряд (до 20) не отождествлявшихся линий (гелий был обнаружен на Земле в 1895 г.). Шведский физик Эдлен смог показать (1942 г.), используя данные лабораторных экспериментов и расчеты электронных конфигураций в атомах, что большинство неотожествленных линий принадлежит атомам Fe, Ni, Ca, Ar, находящимся в высоких состояниях ионизации. Самые выдающиеся из этих линий — λ 3388 Å и λ 5303 Å. Первая из них создается при переходе в ионе Fe X и вторая — в ионе Fe XIV, причем эти переходы являются запрещенными. Столь высокая степень ионизации может достигаться, как следует из расчетов, при температурах порядка 10^6 К. Обычно считалось, что температура в короне не выше, чем в фотосфере ($\lesssim 5500$ К). Представление о горячей короне многими было воспринято с недоверием, и только после того, как столь высокая температура была подтверждена данными об излучении Солнца в радиодиапазоне, оно стало общепризнанным.

Переходный слой между фотосферой ($T \approx 5500$ К) и короной ($T \approx 10^6$ К) включает хромосферу — область, которая во время полного солнечного затмения видна как «цветное кольцо». До 40-х годов ее большая протяженность, значительно превосходившая ту, которая получается по барометрической формуле при температуре $T \approx 5500$ К, приписывалась действию давления излучения на атомы кальция. Но поскольку при горячей короне температура в хромосфере должна быть гораздо более высокой (20 000 – 30 000 К), ее большая протяженность нашла объяснение.

Солнце оказалось первым из небесных тел, спектр которого в ультрафиолетовой области был получен при заатмосферных наблюдениях с помощью высотной ракеты (1946 г.). В нем оказалось множество эмиссионных линий на слабом непрерывном фоне, причем особенно сильно выделялась линия атома водорода L_α (λ 1216 Å), соответствующая переходу между первым и вторым энергетическими уровнями («резонансная»). При запуске ракеты было обнаружено также излучение Солнца в рентгеновском диапазоне.

В Йеркской обсерватории У. Морганом и Ф. Кинаном в результате изучения большого наблюдательного материала в 40-е годы была разработана двумерная (МК) классификация звездных спектров. В ней учитывается не только спектральный класс, но и светимость звезды в той области диаграммы Г–Р, в которой зависимость между L и спектром неоднозначна. Характеристики I и II описывают очень яркие и менее яркие звезды-

сверхгиганты, III — нормальные гиганты, IV — субгиганты и V — звезды главной последовательности.

Применяя специальную методику при наблюдениях на 100-дюймовом телескопе В. Бааде смог разрешить на звезды несколько близких галактик. Кроме того, им был изучен звездный состав шаровых скоплений. В результате исследования свойств звезд в тех и других системах Бааде выделил два типа звездного населения. К I типу относятся звезды главной последовательности и сверхгиганты, ко II типу — звезды, наблюдаемые в центральных областях («ядрах») спиральных галактик, эллиптических галактиках и шаровых скоплениях. Звезды I и II населений различаются также по кинематическим особенностям и пространственному распределению. Вместе с тем для каждого из населений существует своя последовательность звезд на диаграмме Г–Р (рис. 45). Численность точек на диаграмме совершенно

Рис. 45. Диаграмма Г–Р для звездных населений двух типов (по Бааде).

не соответствует истинной величине пространственной концентрации звезд вследствие наблюдательной селекции по звездным величинам.

Интенсивные исследования по теории звездных атмосфер, производившиеся в 40 – 50-е годы, потребовали определения коэффициента непрозрачности в зависимости от состава газа и физических условий, в которых он находится. Детальные наблюдения звезд показали, что распределение энергии в спектрах далеко от соответствия чернотельному. В частности, еще в 1938 г. было выяснено, что в поглощении излучения в фотосфере Солнца и других звезд того же класса важную роль играют отрицательные ионы водорода. Расчеты профилей и интенсивностей спектральных линий (моделирование) производились с использованием уточненных выражений коэффициентов непрозрачности. Их результаты применялись для определения химического состава звездных атмосфер. Химический состав звезд является одним из важнейших параметров при расчетах их эволюции. Содержание элементов в атмосферах оценивалось по эквивалентным ширинам линий поглощения — методом «кривых роста». Сравнение наблюдаемых профилей с рассчитанными (так называемый «тонкий анализ») давало более точные результаты, чем метод кривых роста, хотя оставалось много не до конца выясненных вопросов, в частности, связанных с необходимостью учета при расчетах профилей линий изменения частоты излучения в процессе рассеяния. Данные определений содержания химических элементов в атмосфере Солнца и найденных у звезд отклонениях от него привел Л. Аллер (США) в книге «Звездные атмосферы» (1960 г.).

К середине 50-х годов было накоплено, помимо данных о химическом составе атмосфер звезд, также большое количество информации о внешних характеристиках звезд — их радиусах, массах и светимостях. К этому же времени физические исследования дали много сведений об эффектив-

ности различных ядерных реакций в зависимости от условий, в которых они протекают, а также о непрозрачности газа в зависимости от его состава. Указанные научные достижения, а также развитие теории переноса излучения и (менее совершенной) теории конвекции создавали возможности для разработки достаточно обоснованной теории звездной эволюции. Но еще ранее были обнаружены особенности диаграммы Г–Р для рассеянных скоплений, которые послужили наблюдательным основанием такой теории.

Исходя из предположения о том, что звезды скопления образуются одновременно (за время, малое по сравнению с возрастом скопления), сравнивая диаграммы Г–Р различных звездных скоплений, можно определить путь звездной эволюции на диаграмме. Для всех скоплений диаграммы

Рис. 46. Сводная диаграмма «цвет–светимость» для рассеянных скоплений и одного шарового скопления (по Сендиджу).

одинаковы в нижней части главной последовательности (для звезд малых масс), а в верхней ее части — различны. Более массивные звезды сходят с главной последовательности, превращаясь в красные гиганты, но массы звезд, у которых этот процесс уже происходит, зависят от возраста скопления (рис. 46). Первая попытка получить выводы об эволюции звезд на основе диаграммы Г–Р была сделана Дж. Койпером (1937 г.), а затем ту же идею развивал Е. Стрёмгрен, считавший, что положение звезды на диаграмме зависит от содержания в ней водорода. На главной последовательности оно максимально, а по мере исчерпания водорода звезда смещается вправо вдоль оси спектральных классов.

Для слабых звезд скопления определение спектрального класса затруднительно, поэтому используют разности звездных величин, получаемых фотоэлектрическими методами с разными фильтрами. В 50 – 60-е годы наиболее распространенной была система UBV (Х. Джонсон и У. Морган, США). Показатели $U - B$ и $B - V$ характеризуют температуру звезды.

Обладая достаточно мощной по тому времени вычислительной техникой, Мартин Шварцшильд (1912–1998, США) рассчитал в 50-е годы множество моделей внутренней структуры звезд. Он впервые определил направление эволюционного процесса в звездах, особенно на поздних его стадиях, после выгорания водорода в центральных областях звезды, которое приводит к образованию вырожденного ядра.

Результаты своих расчетов и предшествующих работ по эволюции звезд Шварцшильд суммировал в монографии «Строение и эволюция звезд» (1958 г.). Так была создана основа одного из важнейших достижений науки — теории звездной эволюции, совершенствование которой продолжалось вплоть до конца XX века.

Неожиданным для астрофизиков обстоятельством оказалось обнаружение магнитных полей в звездах и межзвездной среде. Использование большого телескопа обсерватории Маунт Вилсон позволило получить спектры звезд с достаточно большой дисперсией, чтобы можно было наблюдать зеемановское расщепление линий. Для исследования полей был создан специальный прибор — магнитограф. Магнитные поля имеют напряженности от сотен до тысячи гаусс. В каталог Х. Бэбкока (1958 г.) внесено 89 звезд, в большинстве своем относящихся к классам А и В, обладающих магнитным полем, причем у многих звезд класса А зафиксированы изменения полярности, а у некоторых — и напряженности поля. Спектры этих звезд также переменны, а линии редкоземельных элементов и кремния, марганца, хрома усилены. Их называют пекулярными (особенными) и классифицируют как Ap, а при усиленных линиях металлов — Am. Звезды Am оказались спектрально-двойными с периодами $P \approx 10^d$. Переменность полей магнитной звезды связывают с ее вращением, считая, что магнитное поле неоднородно по ее поверхности. Соответственно, была выдвинута гипотеза о магнитных звездах как «наклонных ротаторах», у которых направление оси вращения не совпадает с направлением оси диполя.

Для исследований структуры внешних слоев звезд, звездных оболочек и туманностей необходимо решение математически сложных задач теории переноса излучения. Результаты, полученные в этой теории к концу 40-х годов, изложены в книгах Чандрасекара «Перенос излучения» (1950 г.) и В. В. Соболева (1915–1999) «Перенос лучистой энергии в атмосферах звезд и планет» (1958 г.). Описанные в этих книгах методы аналитического и численного исследования процесса переноса излучения широко использовались и совершенствовались. Расчеты, связанные с определением свечения нестационарных звезд на основе имевшейся теории переноса излучения, долго оставались чрезмерно сложными. Трудность их обуславливалась тем, что звездные оболочки расширяются, а при этом часто и вращаются. Однако именно движение оболочек с достаточно большой скоростью — превышающей скорость теплового движения в них — позволило Соболеву свести решение сложной системы интегродифференциальных уравнений теории переноса к решению гораздо более простой системы алгебраических уравнений. Опубликованная им монография «Движущиеся оболочки звезд» (1947 г.), переведенная впоследствии на английский язык, содержала, помимо теоретических выводов, результаты приложения теории к конкретным объектам — оболочкам звезд Вольфа–Райе, новым звездам и планетарным туманностям. В 50-е годы в Ленинградском университете производились дальнейшие исследования звездных оболочек на основе указанной теории. Кроме того, там изучались процессы, приводящие к нарушению лучистого равновесия в звездных оболочках. Эти расчеты были использованы для определения структуры оболочек нестационарных

звезд и физических условий в них, а также динамики и эволюции оболочек этих объектов. В 40 – 60-е годы изучение нестационарных объектов и физических процессов в них проводилось в ряде обсерваторий, институтов и университетов США и европейских стран. При этом было получено много новых наблюдательных данных о нестационарных звездах.

Главной особенностью нестационарных звезд является наличие в спектре эмиссионных линий. Однако у многих из них наблюдается переменность блеска, что заставляет относить такие объекты к числу физических переменных. Как правило, значительные изменения блеска одиночных звезд вызваны внутренними причинами. В Москве с 30-х годов производилась каталогизация и систематизация переменных звезд, издавались их каталоги. Первым стал составленный Б. В. Кукаркиным и П. П. Паренаго «Общий каталог переменных звезд» (1948 г.), впоследствии дополнявшийся. Он часто использовался наблюдателями. Каталоги и списки меньшего масштаба составлялись в США, Германии, Франции и других странах.

Переменные звезды по характеру изменений блеска отличаются большим разнообразием. Помимо пульсирующих переменных, к которым относятся, в частности, цефеиды, выделяют эруптивные, полуправильные и неправильные переменные звезды. В группу эруптивных звезд входят новые звезды и другие, испытывающие вспышки. Из звезд остальных двух типов наибольший интерес в 40-е годы представляла сравнительно малочисленная эруптивная группа звезд типа Т Тау, характеризующихся неправильными изменениями блеска с амплитудой до 3^m . По спектру они относятся к сравнительно «холодным» звездам классов F, G, K, но вместе с тем в этих спектрах наблюдаются эмиссионные линии, свойственные более «горячим» звездам. Как правило, эти звезды пространственно связаны с диффузными туманностями. В начале 40-х годов было установлено, что звезды типа Т Тау распределены по небесной сфере крайне неравномерно — они сосредоточены в нескольких занимающих сравнительно малые области неба группах. Обратив внимание на этот факт, Амбарцумян отнес их к звездным системам особого вида, которые он назвал звездными ассоциациями. Они характеризуются высокой парциальной плотностью звезд достаточно редко встречающегося типа по сравнению с плотностью звезд галактического поля. Под действием гравитации звезд поля ассоциации должны распадаться за время порядка миллиона лет, что очень мало по сравнению с продолжительностью жизни звезды. Было также установлено существование O–B ассоциаций, в которых высока парциальная плотность голубых сверхгигантов. Поскольку случайное образование ассоциаций путем скопления звезд редкого типа в одной области представляется крайне маловероятным, существование звездных ассоциаций показывает, что звездообразование происходит и в современную эпоху, причем звезды должны

«рождаться» группами. Возраст наблюдаемых в ассоциации звезд на два-три порядка меньше, чем возраст Солнца. Образующие ассоциацию звезды через некоторое время должны смешаться со звездами галактического поля. Это было впоследствии доказано определениями скоростей их движения.

Важное для астрофизики открытие было сделано одновременно в СССР и США при изучении звезд фотометрическим методом. Оказалось, что свет звезд, проходя через межзвездную среду, частично поляризуется (У. Хилтнер и А. Холл (США), В. А. Домбровский (СССР), 1949 г.). Через два года был предложен механизм (Р. Девис и Дж. Гринстейн, США), действием которого объяснялось появление поляризации. Она создается при прохождении света звезды через среду, содержащую несферические частицы, обладающие магнитными свойствами. Эти частицы определенным образом ориентируются под действием магнитного поля и при рассеянии на них света поляризуют его. Таким образом по наблюдениям поляризации излучения звезд было установлено наличие в Галактике крупномасштабных магнитных полей с напряженностью в несколько микрогаусс.

В те же годы была разработана теория флюктуаций поверхностной яркости Млечного Пути, вызванных присутствием в нем поглощающих свет облаков. Оказалось, что облака располагаются вблизи плоскости Галактики и вытянуты вдоль этой плоскости — возможно, под действием магнитного поля.

В конце 40-х годов начались наблюдения радиоизлучения Галактики в непрерывном спектре. Такое излучение может быть тепловым — возникающим в результате излучения энергии свободными электронами, которые при движении вблизи протонов переходят с одной гиперболической орбиты на другую. Существует и другой вид излучения с непрерывным спектром — синхротронное. Оно возникает при движении электронов очень высокой энергии (релятивистских) в магнитном поле и является поляризованным. Наблюдения показали, что непрерывное излучение исходит частично из областей, близких к плоскости Галактики, частично из сфероидальной короны Галактики. Обнаруженные отдельные (дискретные) источники этого излучения представляют собой либо области H II в межзвездном газе, либо туманности, образовавшиеся при вспышках сверхновых. Одной из таких туманностей является Крабовидная туманность, которая образовалась при вспышке в 1054 г. сверхновой в созвездии Тельца. Ее излучение в радиодиапазоне также обуславливается действием синхротронного механизма. Предположение о том, что непрерывное излучение и в оптическом диапазоне имеет ту же природу (И. С. Шкловский, 1954 г.), было убедительно подтверждено обнаружением поляризации излучения Крабовидной туманности (1954 г.). Этот вывод оказался очень важным для исследования остатков сверхновых звезд.

Высказанная в 50-х годах гипотеза о том, что радиоизлучение от галактической короны является нетепловым, подтвердилась, как и вывод о наличии в ней релятивистских электронов, создающих поляризованное излучение. В это же время развивалась теория об образовании при вспышках сверхновых звезд космических лучей (впервые предположение о таком их происхождении было высказано в 1939 г. Ф. Цвикки), изложенная в монографии В. Л. Гинзбурга и С. И. Сыроватского «Происхождение космических лучей». Образованные при вспышке космические лучи, диффундируя в магнитном поле Галактики, уходят из области своего рождения — галактической плоскости — и попадают в корону. Таким образом в результате радиоастрономических наблюдений была создана самосогласованная картина высокоэнергетических процессов, происходящих в Галактике. Результаты изучения вспышек сверхновых звезд и образовавшихся при этом туманностей содержатся в монографии И. С. Шкловского «Сверхновые звезды» (1966 г.).

Полное излучение Галактики в радиодиапазоне составляет незначительную долю ее общей светимости. То же характерно для большинства наблюдаемых галактик, например, М 31. Но вместе с тем имеются галактики с аномально сильным радиоизлучением, сравнимым с излучением в оптическом диапазоне. Такие объекты называли радиогалактиками. К их числу относится второй по мощности источник принимаемого на Земле радиоизлучения — галактика Cyg A, галактики Vir A, Cen A и ряд других. Все они имеют особенности морфологии и оптического спектра, отличающие их от нормальных галактик. В конце 50-х годов были получены свидетельства того, что у радиогалактик излучение, исходящее из их центральной области, нетепловое.

Вблизи от галактической плоскости оптическое излучение настолько сильно поглощается, что наблюдатели лишены возможности изучать структуру Галактики как в направлении ее центра, так и в противоположном. Излучение с длиной волны λ 21 см поглощается слабо, и поэтому, наблюдая его интенсивность в разных направлениях, удалось найти пространственное распределение нейтрального водорода в Галактике. Оказалось, что он образует диск со спиральной структурой. В центральной части Галактики находится ядро — источник нетеплового излучения размером 10 пк, и область, содержащая сгущения нейтрального водорода, на два порядка более обширная (см. рис. 47).

Рис. 47. Схема распределения нейтрального водорода в галактическом диске (по данным радионаблюдений).

При изучении межзвездного газа в конце 40-х годов стали использоваться методы газодинамики. Так как движения в межзвездной среде большей частью сверхзвуковые, то большую роль в ее динамике и свечении играют

ударные волны. Результаты исследований распространения ударных волн в межзвездной среде описаны в монографии С. А. Каплана «Межзвездная газодинамика» (1958 г.).

Многие теоретические исследования динамики бесстолкновительного самогравитирующего газа, частицами которого являются звезды, были выполнены в 40-е – 50-е годы. В это же время изучались кинематические особенности звездных систем, их структура и устойчивость. Этим проблемам посвящена монография К. Ф. Огородникова «Динамика звездных систем» (1958 г.).

В те же годы В. А. Амбарцумян привел ряд убедительных доводов в пользу представлений о важности для эволюции галактик процессов, происходящих в их ядрах — «активности галактических ядер». Одним из проявлений такой активности являются выбросы из ядер газа в виде струй («джетов»), которые наблюдались у Cyg A, Vir A и других радиогалактик. К галактикам с активными ядрами было отнесено и несколько объектов, открытых К. Сейфертом (США) в 1943 г. и названных сейфертовскими галактиками. Спектр излучения, испускаемого ядрами этих галактик, характеризуется очень широкими эмиссионными линиями, кроме того, они являются мощными источниками радиоизлучения.

В 50-е годы в обсерватории Маунт Паломар на основе снимков, сделанных в двух цветах на 120-сантиметровом широкоугольном телескопе, был создан атлас неба, содержащий обширный материал для изучения структуры Метагалактики. По этому атласу Г. Эйблом (США) был составлен каталог около 1700 скоплений галактик. Большинство из них содержит около сотни галактик, доступных наблюдениям (с интегральной звездной величиной до 14^m). В отличие от звезд, у которых близкие прохождения случаются очень редко, в областях большой концентрации галактики взаимодействуют, что должно сказываться на их морфологии. Б. А. Воронцовым-Вельяминовым был составлен «Атлас взаимодействующих галактик», опубликованный в 1959 г. Производилась также каталогизация галактик по их свойствам — цвету, скорости движения и т. п.

В разработку космологических моделей в послевоенные годы был внесен новый элемент — концепция начала Вселенной в форме «Большого Взрыва» (*Big Bang*), в результате которого заполняющее Вселенную вещество должно было первоначально обладать очень высокой температурой, что могло привести к синтезу тяжелых элементов (Г. Гамов, 1944–1948 гг.). Важное значение для развития в дальнейшем представлений о Большом Взрыве имело уточнение постоянной Хаббла, однако в те годы к однозначному мнению о ее величине прийти не удалось.

В 1951 г. К. Ф. Вейцеккер (Германия) высказал гипотезу о том, что галактики образовались из турбулентных вихрей догалактической среды, но в то время она не встретила поддержки.

Лекция XIX

Астрономия в 60 – 80-е годы XX века

Бурный рост техники в 60-е и последующие годы создал условия для развития экспериментальной стороны науки. Это относилось не только к европейским странам, США и Канаде, но и ко многим азиатским и латиноамериканским странам, в частности к Японии, Индии, Бразилии, а также к Австралии, где появились крупные научные центры и проводилась подготовка специалистов для работы в них.

Интенсивное развитие астрономии, в особенности на тех ее направлениях, которые базируются на наблюдениях, связано с широким использованием ИСЗ для проведения наблюдений небесных тел вне атмосферы. Это дало возможность распространять исследования на ранее недоступные диапазоны электромагнитного излучения.

Вместе с тем развернулось строительство больших обсерваторий с установкой в них телескопов с диаметром зеркала три-четыре метра. Таких обсерваторий за рассматриваемый период было построено свыше десяти. Они располагаются преимущественно в Южном полушарии или в приэкваториальном поясе, причем на значительной высоте — например, на Гавайских островах (Мауна-Кеа, 1970 г.) на высоте 4200 м, на Канарских островах. На Северном Кавказе на высоте 2100 м был установлен (1975 г.) крупнейший

Рис. 48. Телескоп с зеркалом 6 м, установленный в САО (сев. Кавказ).

в то время в мире телескоп с зеркалом диаметром 6 метров (рис. 48). Начались наблюдения на горе Хопкинс (Аризона, США) с использованием телескопа новой конструкции — многозеркального с автоматической наводкой зеркал.

Конструировались и вводились в строй крупные радиотелескопы, в частности, в Эффельсберге (Германия) с зеркалом диаметром 100 м, РАТАН-600 (СССР), «Очень большая антенная решетка» — VLA (США), состоящая из 27 параболических зеркал, диаметр каждого из которых 25 м.

Одновременно на больших и средних телескопах стали применяться совершенные светоприемники — такие как ПЗС-матрицы, позволяющие фиксировать до половины фотонов, испускаемых источником и попадающих в телескоп.

Наконец, еще один важнейший фактор, определивший быстрый прогресс астрономии — развитие электроники, позволившее осуществить автоматизацию наблюдений и телеметрическую передачу информации с заатмосферных обсерваторий. Совершенствование быстродействующих ЭВМ обеспечило создание международной сети для наблюдений радиоисточников, быстрый обмен информацией, ускоренную обработку наблюдательных данных и создание хранилищ информации — банков данных.

Обилие информации, получаемой как при наземных, так и при внеатмосферных наблюдениях, таково, что здесь невозможно даже описать сказать многие, даже важные результаты. Тем не менее те, о которых будет сказано, в значительной степени преобразили существовавшие в первой половине XX века представления о населении, структуре и эволюции звездных систем различных масштабов. Особенно много нового материала дали наблюдения галактик и скоплений галактик — они в рассматриваемый период изучались очень интенсивно. Возросла роль космических объектов в качестве «лабораторий», где происходят процессы, недоступные для изучения в земных условиях. Это еще более укрепило связь между физикой и астрономией. В качестве примера такой связи можно указать на эксперимент по детектированию потока нейтрино от Солнца, который оказался гораздо меньше ожидавшегося на основе детальных расчетов структуры Солнца. Этот факт вызвал ряд исследований физических свойств нейтрино и астрофизических расчетов по уточнению модели строения Солнца. В физике было выполнено множество работ, в которых уточнялись сечения ядерных реакций нуклеосинтеза и исследовалась кинетика реакций. Результаты важных для астрофизики исследований в области ядерной физики и их применений в теории звездной эволюции приведены в книге Г. С. Бисноватого-Когана «Физические вопросы теории звездной эволюции» (1989 г.). Существенными для понимания свойств межзвездной среды и процесса образования из нее звезд были расчеты строения сложных молекул и их спектров. Благодаря этим расчетам, по молекулярным линиям, длины волн которых находятся в радиодиапазоне, установлено присутствие в межзвездной среде сложных молекул. Результаты работ в области молекулярных спектров описаны в книге Г. Герцберга «Электронные спектры и строение многоатомных молекул» (1969 г.).

В XIX веке и первой половине XX века в астрономии происходила дифференциация по методам исследования и по объектам. Во второй половине XX века появилась тенденция к сближению различных областей астрономии и восприятию Вселенной как целого. Это проявилось, например,

в том, как было совершено крупнейшее астрономическое открытие — обнаружение объектов, названных квазарами («квазизвездные» источники излучения). В одном из составленных в Кембридже каталогов источников космического радиоизлучения (1959 г.) отсутствовали отождествления этих источников с оптическими объектами, угловая разрешающая способность радиотелескопов в то время была недостаточно высокой. Координаты источников пытались уточнять при наблюдении их покрытий Луной. Из данных, полученных на основе небесной механики, положение края Луны известно с высокой точностью, и положение источника определялось с точностью до $1''$. Как установил (1963 г.) М. Шмидт (США), источник 3С 273 (обозначение по 3-му Кембриджскому каталогу радиоисточников) отождествляется со слабой звездой, спектр которой необычен — в нем видны широкие эмиссионные линии, причем для наиболее ярких из них соотношение между длинами волн такое же, как между линиями бальмеровской серии водорода, однако они смещены на величину $\Delta\lambda = 0.158\lambda$. Если принять, что это смещение обусловлено эффектом Доплера, то радиальная скорость источника оптического, а значит, и радиоизлучения оказывается очень высокой. Этот факт подтверждается смещением линий других элементов.

Предположение, что объект 3С 273 внегалактический, и для него выполняется соотношение Хаббла между скоростью радиального движения и расстоянием, приводит к выводу, что он находится на расстоянии, большем 10^3 Мпк, и должен иметь очень большую светимость, превосходящую светимость обычных галактик на три порядка. Аналогичные заключения были сделаны и для других подобных источников радиоизлучения, например 3С 48, 3С 236. Наблюдаемая быстрая переменность излучения источников — за время порядка месяца — является свидетельством очень малого их размера (сравнимого с размером Солнечной системы). Столь небольшим объемом испускается энергия, превосходящая 10^{45} эрг/с. Поэтому открытие квазаров вызвало множество исследований, в которых пытались установить природу мощных источников излучаемой энергии.

Вскоре после открытия квазаров была разработана методика радиоинтерферометрии со сверхдлинной базой (РСДБ). По идее, выдвинутой группой радиоастрономов в СССР (1965 г.), в качестве базы интерферометра использовался земной шар. Взаимодействие между радиотелескопами, установленными на большом расстоянии друг от друга, позволило достигать разрешения выше чем $0''.001$. Благодаря этому изучалась детальная структура радиоисточников, в том числе квазаров.

Еще одно важное событие в радиоастрономии определило в значительной мере понимание конечных стадий эволюции звезд. В 1967 г. Энтони Хьюишем (Англия) были обнаружены нейтронные звезды, о возможности существования которых, как уже говорилось (лекция XVII), делались

предположения еще в 30-е годы. В ходе обычного изучения радиоисточников оказалось, что один из них — переменный с дискретными вспышками («пульсами») — отличается строгой периодичностью ($P = 1^s.337$). Это обстоятельство, а также обнаружение аналогичного объекта в центре остатка вспышки сверхновой — Крабовидной туманности — привело к выводу, что наблюдаемые источники представляют собой быстровращающиеся нейтронные звезды. Их назвали пульсарами. При коллапсе (схлопывании) звезды, вызывающем вспышку сверхновой, должен сохраняться угловой момент. Радиус нейтронной звезды очень мал — около 10 км — и поэтому она вращается с очень большой скоростью. Напряженность магнитного поля нейтронной звезды благодаря сохранению магнитного потока при коллапсе достигает огромных значений $10^{11} \div 10^{12}$ Гс.

Важнейшим для развития астрономии событием стала открывшаяся благодаря запуску искусственных спутников Земли возможность наблюдений коротковолнового ($\lambda \approx 1 \div 10 \text{ \AA}$) излучения небесных тел (рентгеновский диапазон), для которого атмосфера непрозрачна. Первая систематическая информация о рентгеновском излучении, идущем из космоса, была получена со спутника «Ухуру», запущенного США с космодрома в Кении (1970 г.), на котором был установлен рентгеновский телескоп. Среди множества источников рентгеновского излучения (более 300) были обнаружены рентгеновские пульсары, аналогичные по величине периода радиопулсарам. Дальнейшие исследования показали, что рентгеновские пульсары входят как компоненты в состав тесных двойных систем. Другая компонента является обычной звездой — в одних случаях сверхгигантом (Сен X-3), в других — карликом (Нер X-1). Обозначение «X» означает принадлежность к рентгеновским источникам.

Кроме рентгеновских пульсаров — дискретных галактических источников — при дальнейших исследованиях обнаружили и протяженные источники рентгеновского излучения, отождествленные со скоплениями галактик. Среди внегалактических источников рентгеновского излучения были галактики с активными ядрами и квазары. С запуском космической обсерватории «Эйнштейн» (1979 г.) объем информации о рентгеновских источниках значительно увеличился благодаря более высокой, чем у ранее применявшейся аппаратуры, чувствительности и конструкции телескопа, позволявшей получать лучшее угловое разрешение (до $3''$). Оказалось, что в скоплениях галактик содержится большое количество газа с очень высокой ($10^7 \div 10^8$ К) температурой.

Плодотворность взаимодействия различных разделов астрономии выявилась также при разработке проблемы звездной эволюции. В установлении факта группового звездообразования важную роль сыграли выводы, полученные в звездной динамике. В отношении механизма образования

звезд в 70-х годах преобладающим стало мнение о том, что они образуются путем сжатия облаков межзвездного газа под действием гравитации. При сжатии газа его температура повышается, и на каком-то этапе это мешает дальнейшему сжатию образовавшейся протозвезды. Поэтому должны включаться механизмы теплоотдачи — выноса энергии из протозвезды наружу. Согласно расчетам, основным фактором охлаждения газа должно быть излучение энергии пылинками, а для звезд первого поколения — молекулами H_2 . На ранних стадиях перенос энергии из внутренних областей протозвезды может осуществляться путем конвекции. На процессе сжатия протозвездного облака должны сказываться его вращение и присутствие магнитного поля. Может произойти и фрагментация облака.

Процесс звездообразования зависит от структуры межзвездной среды, физических условий в ней, состава, в частности от наличия твердой компоненты — пылевых частиц. Как следует из наблюдений, «молодые» звезды ассоциируются с молекулярными облаками, состав и структура которых определяются по молекулярным спектрам, изучаемым радиометодами.

Вследствие большой сложности процесса звездообразования и неопределенности начальных условий к концу 80-х годов многие вопросы теории оставались нерешенными. Несовершенство традиционных представлений о структуре межзвездной среды выразилось в том, что только в 1979 г. были обнаружены гигантские молекулярные облака с массами порядка $10^6 M_{\odot}$, в которых, как оказалось, заключена основная доля межзвездного вещества. Однако то, что звезды возникают из диффузной межзвездной среды, большинством астрономов сомнению не подвергалось. Образовавшиеся звезды после включения термоядерных источников оказываются на главной последовательности диаграммы Г–Р в точке, определяемой значением массы звезды. С этого момента начинается ее эволюция. Расчет эволюционной модели заключается в определении движения точки, соответствующей модели, по плоскости $(L; T_{eff})$ («эволюционного трека»). Наблюдаемое излучение, определяющее эффективную температуру, выходит из внешних слоев звезды и поэтому расчеты модели звезды (ее внутреннего строения) сопровождаются расчетами моделей атмосфер, т. е. определением того, как распределены в атмосфере температура, плотность и другие физические величины. После таких расчетов можно моделировать спектр, для чего необходимо решить сложную математическую задачу о диффузии излучения как в непрерывном спектре, так и в частотах линий. Проблемы, связанные с формированием спектров, освещены в книге В. В. Иванова «Перенос излучения и спектры небесных тел» (1969 г.). С применением мощных ЭВМ стало возможным решать задачу о переносе излучения в частотах многих спектральных линий. Благодаря этому удается гораздо точнее, чем прежде, определять содержание химических элементов в звездных атмосферах по

наблюдаемым спектрам. Современные методы расчетов моделей атмосфер рассмотрены в монографии Д. Михаласа «Звездные атмосферы» (1982 г.).

В ходе эволюции звезды изменяется химический состав газа в ее недрах. После выгорания водорода в центральных областях энергия в звезде вырабатывается путем термоядерных реакций с участием более тяжелых элементов. Вопрос о том, происходит ли перемешивание вещества звезды в процессе ее эволюции, до 80-х годов оставался нерешенным — предполагалось, что по крайней мере у некоторых звезд перемешивание должно быть. Информация об этом, как и об особенностях протекающих в звезде термоядерных реакций, может быть получена путем исследования спектров. В 70 – 80-х годах расчеты эволюции звезд производились в предположении об отсутствии перемешивания.

Эволюция звезды малой массы должна, согласно расчетам, заканчиваться образованием белого карлика. Звезды промежуточных масс (до $10 M_{\odot}$) после окончания термоядерной эволюции вспыхивают как сверхновые II типа и при этом образуются нейтронные звезды (пульсары). Если же после завершения термоядерного горения масса звезды остается достаточно большой, то при ее коллапсе может образоваться «черная дыра», т. е. объект, размеры которого меньше гравитационного радиуса. Таким образом, схематическая картина эволюции одиночных звезд в 80-е годы представлялась достаточно выясненной.

На эволюцию звезд — компонент тесных двойных систем влияет очень важный фактор — обмен веществом между компонентами. Создаваемое звездами гравитационное поле обладает своеобразной конфигурацией. Вдали от систем эквипотенциальная поверхность однополостная, а вблизи компонент — двуполостная. Разделяющая эти типы поверхность называется «критической поверхностью Роша» (Эдуард Рош (1820–1883) — французский астроном). Она обладает тем свойством, что по ней вещество способно без затраты энергии перемещаться из окрестности одной из компонент в окрестность другой. Процесс перетекания вещества может начаться, если одна из компонент, расширяясь, заполнит свою «полость Роша». Значение этого обстоятельства для эволюции звезд было осознано только в 60-х годах, когда выяснилось, что в двойные системы входит большая доля (возможно, около половины) всех звезд. В процессе своей эволюции звезда «сходит» с главной последовательности и превращается в «красного гиганта», значительно увеличивая свой размер. При этом может произойти заполнение полости Роша и начаться перетекание вещества от нее к другой компоненте.

Интерес к исследованию тесных двойных систем оживился после того, как было обнаружено, что в таких системах происходят вспышки новых звезд (Р. Крафт, США, 1965 г.), а затем было найдено, что некоторые из дискретных рентгеновских источников являются тесными двойными си-

стемами. Итоги изучения структуры таких систем изложены в книге канадского астронома А. Баттена «Двойные и кратные звездные системы» (1973 г.).

Процесс перетекания вещества в тесных двойных системах до середины 60-х годов изучался методами небесной механики, что было недостаточным для его правильного описания. В процессе перетекания газа преобладающую роль играют специфические газодинамические явления — такие как турбулентность, расширение газа в вакуум, ударные волны. Это сделало необходимым применение для интерпретации явлений, происходящих в звездах (включая и одиночные) и звездных системах, методов газовой динамики.

Строение звезд, и в частности Солнца, может быть в полной мере раскрыто только при наличии полной теории конвекции. Движения в звездных атмосферах и оболочках приводят к возникновению ударных волн, обуславливающих не только динамику оболочек, но и особенности их свечения. Все эти проблемы интенсивно изучались в 60 – 70-е годы сначала аналитически, а затем моделированием на ЭВМ. Одним из результатов этой работы была разработанная теория аккреции (выпадения) газа на звезды. Оказалось, что аккреция газа на белый карлик в тесной двойной системе приводит к вспышкам новых звезд. В тех случаях, когда масса белого карлика близка к пределу Чандрасекара, аккреция газа может привести к вспышке сверхновой. Аккрецией газа на нейтронную звезду объясняется явление рентгеновского пульсара. Результаты изучения этих и других явлений, связанных с динамикой течений газа в астрофизических объектах, приведены в книге В. Г. Горбацкого «Космическая газодинамика» (1977 г.). Теория вспышек сверхновых и явлений, вызванных такими вспышками в межзвездной среде, заняла видное место в астрофизических исследованиях 70 – 80-х годов.

В течение своей жизни звезды теряют вещество не только при вспышках новых и сверхновых звезд, но и путем истечения газа — так называемого звездного ветра. Потоки текущего из Солнца газа, обнаруженные при наблюдениях с ИСЗ — солнечный ветер — не являются настолько мощными, чтобы повлиять на его эволюцию. Звездами-гигантами и сверхгигантами, как спектрального класса О, так и позднего класса М за короткое время ($10^6 \div 10^8$ лет) теряется в форме звездного ветра значительная масса, особенно в тех случаях, когда звезда входит в состав тесной двойной системы. Изучению звездного ветра в 60 – 80-е годы было посвящено много теоретических исследований. Истечение газа из сверхгигантов происходит под действием давления излучения, а у звезд, обладающих конвективными зонами, является следствием перехода кинетической энергии конвективных движений в энергию истекающего газа.

Солнечный ветер исследовался вместе с другими явлениями, протекающими на Солнце. Значительный интерес представляют солнечные вспышки и возможность их прогнозирования. Наблюдения показали, что излучение солнечных вспышек обеспечивается за счет энергии магнитного поля, освобождающейся при перезамыкании магнитных силовых линий противоположной направленности.

Аналогичные солнечным, но более мощные вспышки происходят на поверхности эруптивных переменных звезд типа UV Cet. В результате многолетних наблюдений в различных обсерваториях было установлено, что вспышки на звездах этого типа также имеют «магнитную» природу. Таким образом, изучение звездных вспышек стимулировало более глубокие исследования по проблеме генерации магнитных полей звезд. По-видимому, усиление полей происходит вследствие перехода энергии движущегося во внешних слоях звезд газа в магнитную энергию. Однако многие детали этого процесса оставались невыясненными.

Значительным достижением в изучении переменных звезд другого типа — пульсирующих — было обнаружение механизма, поддерживающего пульсации. Как установил С. А. Жевакин, проводя расчеты звездных моделей (1956–1963 гг.), цефеиды и звезды типа RR Lyr представляют собой автоколебательные системы, в которых действует «клапанный механизм». Поток энергии, выработанной в звезде, проходя через зону, где происходит вторая ионизация гелия, периодически задерживается, что приводит к накоплению энергии и последующему ее испусканию. Действие клапанного механизма должно быть согласовано с изменениями плотности газа, вызванными пульсационными изменениями радиуса звезды. Для эффективного действия механизма необходимо, чтобы содержание гелия в звезде было достаточно высоким. Поэтому звезды оказываются пульсирующими, проходя в своей эволюции через «полосу неустойчивости» на диаграмме Г–Р.

Потерянный звездами газ перемешивается с межзвездной средой, и поэтому ее химический состав меняется. Процесс звездообразования зависит от химического состава и структурных особенностей межзвездной среды. В связи с этим составляющие население Галактики звезды принадлежат к разным поколениям, различающимся возрастом и химическим составом. Эти различия проявляются в наблюдениях — в кинематических свойствах звезд и в особенностях их распределения в пространстве.

В 60 – 70-е годы благодаря значительному совершенствованию методики наблюдений галактик и определения расстояний до них по величине смещения абсорбционных линий («красное смещение») было получено много информации о расстояниях до галактик, их морфологии и физических свойствах. Была также определена функция светимости галактик — зависимость пространственной концентрации галактик от светимости. Сплюс-

нутость эллиптических галактик обычно объяснялась в предположении, что они представляют собой быстро вращающиеся конфигурации. Однако оказалось, что скорость вращения у них недостаточна для того, чтобы обеспечить наблюдаемую сплюснутость. По-видимому, форма таких галактик обусловлена анизотропным распределением скоростей звезд, и они могут представлять собой трехосные эллипсоиды.

Галактики являются самогравитирующими системами, состоящими из бесстолкновительного самогравитирующего газа звезд. Движения звезд зависят от создаваемого ими же гравитационного потенциала, и поэтому рассмотрение динамики таких систем и их свойств связано с решением сложных математических задач. Исследования в этом направлении проводились во многих местах и особенно интенсивно в астрономических учреждениях Ленинграда, Москвы и Эстонии.

Проблема образования наблюдаемой спиральной структуры галактик долгое время оставалась нерешенной. Галактики типа S содержат три структурных компонента — диск, балдж в центральной части диска и гало (корону). Балдж имеет форму сжатого сфероида и во многих отношениях подобен эллиптическим галактикам. Что же касается структуры диска, то еще в 1941 г. Б. Линдبلاد высказал предположение о спиральных волнах плотности — возмущениях плотности, распространяющихся по вращающемуся диску и создающих наблюдаемый спиральный узор. В 60-х годах эта концепция разрабатывалась математически, причем расчеты производились в линейном приближении. На основе их результатов объяснялись многие наблюдаемые явления. Звездообразование связывалось с действием спиральных ударных волн, возникающих при падении внутригалактического газа в потенциальную яму, создаваемую волной плотности. Плотность падающего газа увеличивается в десятки раз, и из него в результате гравитационной неустойчивости могут образовываться звезды. Модельными расчетами возможность такого процесса подтвердилась, однако в проблеме возникновения спиральной структуры оставалось много невыясненного. В частности, как следует из наблюдений, амплитуда возмущений плотности в Галактике слишком велика, чтобы можно было использовать в расчетах линейное приближение. Кроме того, нерешенным оставался вопрос о механизмах возбуждения спиральных волн плотности, которые в отсутствие «подпитки» должны быстро затухать — за один-два оборота Галактики.

С проблемой звездообразования тесно связан вопрос о механизме генерации в Галактике крупномасштабного магнитного поля, существование которого следует из наблюдений. В 70-х годах была создана теория, объясняющая усиление поля турбулентными движениями в межзвездном газе. Предлагались и другие гипотезы. Окончательный выбор между ними тогда сделан не был.

Что касается устойчивости самогравитирующих бесстолкновительных систем, то при большом объеме исследований, посвященных этой проблеме, она оставалась — по меньшей мере, до конца 80-х годов — далекой от полного решения, хотя был получен ряд важных результатов в предположении о квадратичной форме потенциала.

В 60-е годы началось систематическое изучение крупномасштабных структур Метагалактики — скоплений галактик. Исследовались их динамические и физические свойства, уточнялись данные о морфологическом типе и зависимости от него состава населения скопления. Было установлено, что относительное содержание спиральных галактик в скоплении быстро уменьшается по мере приближения к его центру. Этот факт объяснялся динамическим взаимодействием галактик с горячим межгалактическим газом, которое приводит к «обдиранию» периферийных областей галактического диска. Неожиданной оказалась обогаченность межгалактического газа скоплений тяжелыми элементами, в особенности атомами железа, относительное содержание которого всего в два-три раза меньше солнечного. В ряде работ путем расчетов на ЭВМ изучались динамические взаимодействия между галактиками. На этой основе была предложена модель эволюции скоплений.

Скорости движения наиболее ярких галактик скопления определяются из наблюдений. В предположении о том, что скопление находится в равновесном состоянии и движение галактик в нем определяется действием его гравитационного поля, оценивалась масса вещества, содержащегося в скоплении. Оказалось, что она на один-два порядка превышает суммарную массу галактик скопления, оцениваемую по их светимости. В этом заключается так называемый «вириальный парадокс», относительно природы которого выдвигалось много гипотез. Обычно предполагалось, что в скоплении имеется «скрытая масса», не дающая наблюдаемого излучения, но природу ее не удавалось установить. В результате статистического анализа распределения скоплений в пространстве было показано, что должна существовать сверхструктура, состоящая из цепочек или волокон, образованных скоплениями. Результаты исследований крупномасштабного пространственного распределения галактик освещены в книге П. Д. Пиблса «Крупномасштабная структура Вселенной» (1983 г.).

В 70-х годах при изучении оптических спектров квазаров в них обнаружили в абсорбции резонансные линии водорода (L_{α}), вследствие эффекта Доплера смещенные в видимую область спектра. Таких линий в одном спектре оказывались десятки (они образовывали так называемый « L_{α} -лес»). Этот факт послужил основанием для вывода о существовании в пространстве между квазаром и наблюдателем «поглотителей». Предполагается, что большая доля их состоит из несвязанных с галактиками гигантских газовых облаков.

Со времени создания первых космологических теорий, основанных на общей теории относительности, в течение почти полувека единственным фактом, подтверждавшим космологические модели, оставалось наблюдаемое красное смещение в спектрах галактик. В 1965 г. было открыто изотропное радиоизлучение на волне 7.35 м. Дальнейшие наблюдения показали, что его спектр соответствует спектру излучения абсолютно черного тела с температурой около 3 К. Оно было интерпретировано как первичное излучение, содержащееся во Вселенной на начальных этапах ее существования и модифицировавшееся в результате увеличения занимаемого им объема — расширения Вселенной. Согласно гипотезе о Большом Взрыве, сначала во Вселенной вещество было «сцеплено» с излучением (одно превращалось в другое), затем излучение в некоторый момент отделяется от вещества (т. е. превращения практически прекращаются) и плотность его со временем уменьшается. Для вещества предполагается возможность возмущений его плотности, которые под действием самогравитации в расширяющейся Вселенной при определенных условиях могут дать начало звездным системам. Процесс формирования галактик, скоплений и наблюдаемой крупномасштабной структуры Метагалактики многократно моделировался на ЭВМ при упрощенных предположениях о начальных условиях, и на этой основе были предложены различные космологические сценарии.

Лекция XX

Состояние астрономии в конце XX века и тенденции ее развития

В последние десятилетия XX века сложились исключительно благоприятные условия для дальнейшего развития астрономии. Это произошло под влиянием нескольких факторов:

- 1) стремительный рост техники и технологии в различных областях — электроники, космической техники и радиотехники в экономически развитых странах;
- 2) создание в предшествующие годы базового уровня науки, когда общие представления о небесных явлениях уже утвердились и в постановке научных задач отсутствует элемент случайности;
- 3) в достаточно обеспеченном обществе экономически развитых стран существует понимание роли, которую играют астрономия и другие фундаментальные науки в культуре человечества;
- 4) Экономически развитые страны оказались достаточно богатыми для того, чтобы вкладывать значительные средства в проекты, не приносящие непосредственной практической пользы.

Важнейшим для астрономической науки обстоятельством явилось также международное сотрудничество в осуществлении больших и сложных проектов — таких, например, как строительство и оснащение крупных наземных обсерваторий, запуски ИСЗ со специальным оборудованием для внеатмосферных обсерваторий и т. п. В короткой лекции невозможно даже перечислить все, что было достигнуто в астрономии за это время, и приходится останавливаться только на главных направлениях астрономии.

Астрономия стала всеволновой — существующей наблюдательной техникой был охвачен весь диапазон длин волн электромагнитного излучения, кроме области $\approx 20 \div 200$ мкм, находящейся на «стыке» инфракрасного и субмиллиметрового диапазонов, для которой трудно изготовить приемники излучения.

Роль наземных наблюдений оставалась очень важной — они могли проводиться систематически в течение длительного времени, а главное — потому, что излучение звезд, содержащих основную долю массы «видимого» вещества во Вселенной, приходится на доступный для таких наблюдений диапазон.

Рис. 49. Комплекс из четырех телескопов с диаметром зеркала 8.2 м (VLT) (Паранал, Чили). Внизу один из них (“Antu”).

Размеры зеркал вводимых рефлекторов увеличились до 8–12 м, из таких телескопов стали создаваться интерферометрические системы. В частности, два одинаковых 8-метровых инструмента (“*Gemini Telescopes*”) установлены в обсерваториях Мауна-Кеа и Сьерра Тололо (Чили), построены четыре телескопа Европейской Южной обсерватории. Функционирует телескоп с зеркалом 15 м в Мауна-Кеа, специально сконструированный для наблюдений в далекой инфракрасной области ($1 \div 5$ мкм).

В исследовании радиоизлучения различных объектов и прежде всего активных ядер галактик благодаря развитию интерферометрии со сверхдлинной базой удалось достичь очень высокого разрешения, существенно ограничить размеры области активного ядра галактики, в которой генерируется энергия, и определить структуру ядра.

Среди внеатмосферных обсерваторий наиболее важные результаты были получены посредством обсерватории имени Хаббла, запущенной в космос в 1987 г. Телескоп с зеркалом диаметром 2.4 м и многими совершенны-

Рис. 50. Космический телескоп «Хаббл» в полете (диаметр зеркала 2.4 м).

ми светоприемниками в первые несколько лет не давал достаточно хороших изображений из-за технических погрешностей. После их устранения в полете (что само по себе является крупным техническим достижением космической техники) наблюдения начали производиться очень эффективно.

В течение 80 – 90-х годов производились запуски ИСЗ, на которых были установлены телескопы и приборы, предназначенные для наблюдений электромагнитного излучения в определенном диапазоне, а также ИСЗ для наблюдения определенных объектов. Среди таких спутников были следующие:

- HIPPARCOS (90-е годы) — для получения точных координат и параллаксов звезд, а также их блеска;

- ISO (1990 г.), IRAS (1983 г.) — для наблюдений в инфракрасном диапазоне;
- ROSAT (90-е годы), CHANDRA, ГРАНАТ — для наблюдений рентгеновского излучения;
- SOHO — для наблюдения Солнца;
- COBE — для наблюдения микроволнового (реликтового) излучения;
- ASCA — для определения химического состава межгалактического газа и галактик по линейчатому спектру в рентгеновском диапазоне;
- CGRO — для наблюдений γ -излучения.

Кроме того, было запущено несколько АМС с приборами для изучения кометы Галлея. По этим наблюдениям были уточнены морфология и структура ядра, а также его химический состав. Искусственные спутники Земли и космические станции для изучения тел Солнечной системы в большом количестве запускались с 70-х годов.

Ниже перечисляются основные из результатов наблюдений, сделанных при посредстве указанных спутников:

- С обсерватории HIPPARCOS передана на Землю информация о положениях 120 000 звезд, определенных с точностью до $0''.001$, их звездных величинах и показателях цвета. Особое значение для различных областей астрономии имеет измерение годичных параллаксов этих звезд.
- Наблюдениями, произведенными ISO и IRAS, среди множества внегалактических источников инфракрасного излучения были обнаружены объекты, имеющие очень большие светимости в ИК-диапазоне и вместе с тем очень слабые — в оптическом. По предположению, они представляют собой галактики с большим содержанием пыли. Вообще, избытки излучения в далекой ИК-области спектра еще ранее стали считаться свидетельством наличия большого количества пыли. Такие избытки имеются и у холодных сверхгигантов (класса M).
- Слабые источники рентгеновского излучения и рентгеновский фон изучались по наблюдениям, сделанным при посредстве ROSAT.
- По спектральным наблюдениям, выполненным при посредстве обсерватории ASCA, изучены профили эмиссионных линий, было установлено, что излучение исходит от газа, аккрецируемого через диск на

черную дыру. Определено содержание различных элементов в межгалактическом газе скоплений галактик, что позволило уточнить представления об эволюции скоплений.

- Запуск спутников КВАНТ и ГРАНАТ имел целью обнаружение в центральной области Галактики переменных («транзиентных») рентгеновских источников и получение спектров их излучения.
- При наблюдениях со спутника SOHO методом гелиосейсмологии было обнаружено, что вращение внутренней области Солнца, находящейся глубже конвективной зоны, является твердотельным. Этим создаются сдвиговые напряжения, которые, возможно, приводят в действие механизм динамо усиления магнитного поля. С помощью специального спектрометра было выяснено развитие эруптивных образований на Солнце. Масштабы выбросов из Солнца настолько велики, что, проникая в корону, они охватывают обширные области.
- Одним из наиболее загадочных феноменов, наблюдавшихся в последние годы, являются вспышки γ -излучения, обнаруженные в 1973 г. с ИСЗ. Длительность их составляет от долей секунд до минут и в своем пике γ -вспышка представляет собой самый яркий объект в Метагалактике. К настоящему времени (2000 г.) удалось наблюдать несколько тысяч вспышек, большинство из них при посредстве γ -обсерватории CGRO (*Compton Gamma-Ray Observatory*). Как показывает ее название, для фиксации γ -излучения применялись приборы, в которых использовался комптон-эффект. Обсерватория функционировала с 1991 г. по июль 2000 г. Некоторые из вспышек ассоциировались с квазарами и яркими галактиками, причем послесвечение наблюдалось в течение нескольких дней. Если принять такое отождествление, то следует заключить, что при γ -вспышках освобождается в форме излучения огромная энергия. Наблюдения со спутника Верро-SAX, также по послесвечению вспышек в рентгеновском и оптическом диапазонах, подтвердили их связь с далекими галактиками. Источники энергии, излучаемой при γ -вспышках, и механизм вспышки остаются невыясненными.

Наблюдения, выполненные и продолжающиеся на обсерватории «Хаббл», дали много информации о нормальных галактиках и галактиках с активными ядрами. Очень важным было наблюдение цефеид в нескольких десятках достаточно удаленных от нас галактик. Определенное по зависимости между периодом и абсолютной величиной цефеид расстояние до этих галактик сравнивалось с величиной расстояния, находимой по закону Хаббла. Таким образом получилось значение $H \approx 75$ (км/с)/Мпк с

погрешностью 10%. Тем самым был получен возраст Вселенной, образованной в результате Большого Взрыва. Он составляет около 13 млрд. лет, что несколько превосходит возраст самых старых шаровых скоплений, определенный на основе современной теории звездной эволюции.

В рассматриваемый период наблюдения звезд различных типов продолжались главным образом для уточнения структуры атмосфер, определений химического состава и характера эволюционных процессов. Однако интерес наблюдателей, имевших возможность использовать большие телескопы, сместился преимущественно к исследованию галактик. И все же в связи со вспышкой в 1987 г. сверхновой звезды сравнительно близко от Солнца — в БМО — внимание снова было обращено к звездам. Изучение блеска этой звезды, эволюции спектра и определение химического состава образовавшейся расширяющейся оболочки во многом подтвердило разработанную в 60 – 70-е годы модель вспышки. В частности, был зафиксирован поток нейтрино от коллапсировавшей звезды, которыми, как было предсказано, должна уноситься большая доля выделяющейся при взрыве энергии. Нейтринные обсерватории в России (Кавказ) и Италии, а также в Японии (в шахте) были построены специально для регистрации нейтринного излучения при вспышках сверхновых.

Помимо того, что вспышки сверхновых играют важнейшую роль в процессах эволюции межзвездной среды в галактиках и межгалактической среды в скоплениях галактик, они могут служить для измерений расстояний до далеких галактик. Кривые блеска сверхновых I типа очень сходны друг с другом даже в деталях, абсолютная звездная величина в максимуме блеска одна и та же. Поэтому сверхновые звезды принимают за «стандартную свечу» и в настоящее время по ним определяют расстояния до очень далеких галактик, в которых наблюдаются вспышки.

В 80-е годы сформировался подход к Галактике как к сложной физической системе, включающей многофазную диффузную среду, звезды, магнитные поля, космические лучи. Теория образования звезд из диффузной среды в общем подтвердилась, но она пока не в состоянии определить достаточно строго даже функцию распределения рождающихся звезд по массам, не говоря уже о таких проблемах, как объяснение процесса звездообразования при учете вращения и магнитного поля. Не установлен также механизм структуризации межзвездной среды. Таким образом, теория эволюции звезд находится на первых этапах своего развития. Тем более это относится к эволюции галактик, для которых не выяснен даже механизм их образования.

Сложной и пока не решенной остается проблема структуры активных галактических ядер. Ее интенсивное изучение на многих обсерваториях привело к выводу о том, что все формы проявления активности — явления квазаров, радиогалактик, сейфертовских галактик, лацертид — могут быть

обусловлены одним механизмом — аккрецией вещества галактики на черную дыру, находящуюся в ее центре. Хотя эта модель дает количественное объяснение для величины излучаемой энергии, она совершенно не разработана в других отношениях. Выброс вещества из ядер в форме джетов, динамика вещества в них — все это остается феноменами, не получившими убедительного объяснения.

Одной из важных проблем, связанных с формированием крупномасштабной структуры Вселенной, является выяснение роли, которую играют в этом процессе газовые структуры, образующие L_α -лес. Составляя по массе значительную долю видимого в Метагалактике вещества, облака L_α -леса должны быть как-то связаны с эволюцией догалактической среды. Из них могут образовываться звездные системы. Наблюдениями на телескопе «Хаббл» установлено существование облаков L_α -леса на сравнительно малых по сравнению с самыми далекими галактиками расстояниях. Поскольку образование галактик в нашу эпоху продолжается — это установлено фактом существования молодых иррегулярных галактик, масса газа в которых сравнима с массой, содержащейся в звездах, то можно полагать, что они возникают из облаков L_α -леса.

В течение долгого времени радиоастрономы пытались найти флюктуации температуры реликтового излучения, полагая, что тогда будет получен ключ к решению проблемы образования галактик. Такие флюктуации на уровне $\frac{\Delta T}{T} \sim 10^{-5}$ были обнаружены, но вопрос об их связи с формированием структуры не выяснен, так как неизвестно состояние вещества в догалактическую эпоху. Проблема «скрытой массы» в последние годы стала не столь актуальной, поскольку выясняется, что она по отношению к массе барионного вещества существенно меньше, чем принималось ранее. В теориях, описывающих начальное состояние Вселенной, также остаются значительные пробелы.

В последние годы одним из крупных событий астрономии стало открытие планет у ближайших звезд. Они обнаруживаются по гравитационному действию их на звезду. Производимое планетами воздействие на движение звезды очень слабое, и его обнаружение является свидетельством высокой точности наблюдений, немыслимой даже в середине XX века. Открытые планетные системы — их к концу 2000 г. насчитывались десятки — оказываются непохожими на систему планет, вращающихся около Солнца, и поэтому проблемы планетной космогонии снова становятся актуальными.

Даже неполное перечисление нерешенных вопросов астрономии показывает, что при всей значимости достигнутых к концу XX века результатов она находится еще далеко от конца пути к полному познанию природы небесных тел. Это не кажется неожиданным — столь сложная система, как Вселенная, не может быть описана простым образом. Для полного описания Вселенной — насколько оно вообще возможно — необходимо гораз-

до более глубокое, чем достигнутое в настоящее время, познание физических законов и создание математического аппарата, способного преодолеть сложность решения нелинейных задач. Одними численными методами при всех их возможностях сделать это вряд ли удастся. К концу века выяснилось, что по темпу развития теория сильно отстает от скорости накопления новых наблюдательных данных, которые, таким образом, могут остаться невостребованными, как это уже не раз случалось в истории астрономии.

Список литературы

Основная

Астрономы. Библиографический справочник. Изд. 2. Киев: Наукова Думка, 1986. 610 с.

Вавилов С.И. *Исаак Ньютон.* Изд. 4. М.: Наука, 1989. 272 с.

Климишин И.А. *Открытие Вселенной.* М.: Физматгиз, 1987. 318 с.

Идельсон Н.И. *Этюды по истории небесной механики.* М.: Физматгиз, 1975. 496 с.

История астрономии в России и СССР. Под ред. В.В. Соболева. М.: Янус-К, 1999. 600 с.

Паннекук А. *История астрономии.* М.: Наука, 1966. 592 с.

Струве О., Зебергс. В. *Астрономия XX века.* М.: Мир, 1968. 548 с.

Нейгебауэр О. *Точные науки в древности.* М.: Физматгиз, 1968. 224 с.

Дополнительная

Белый Ю. *Тихо Браге.* М.: Наука, 1982. 228 с.

Воронцов-Вельяминов Б.А. *Очерки истории астрономии в России.* М.: Гостехиздат, 1956. 371 с.

Воронцов-Вельяминов Б.А. *Лаплас.* М.: Наука, 1985. 318 с.

Еремеева А.И. *Вселенная Гершеля.* М.: Наука, 1966. 320 с.

Еремеева А.И., Цицин Ф. *История астрономии.* М.: Изд-во МГУ, 1989. 250 с.

Лавринович К.К. *Фридрих Вильгельм Бессель.* М.: Физматгиз, 1989. 320 с.

Невская Н.И. *Петербургская астрономическая школа XVIII века.* Л.: Учпедгиз, 1984.

Хауз Д. *Гринвичское время и открытие долготы.* М.: Мир, 1983. 240 с.

Хокинс С., Уайт Дж. *Разгадка тайны Стоунхенджа.* М.: Мир, 1984.

Шаров А.С., Новиков И.Д. *Человек, открывший взрыв Вселенной. Жизнь и труды Эдвина Хаббла.* М.: Наука, 1989. 206 с.