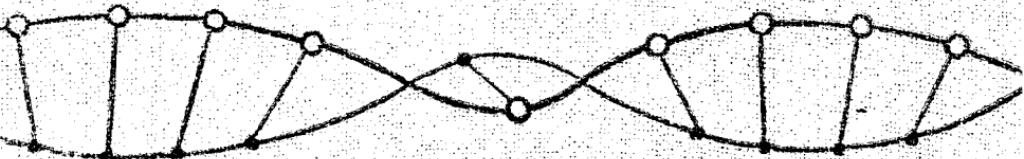
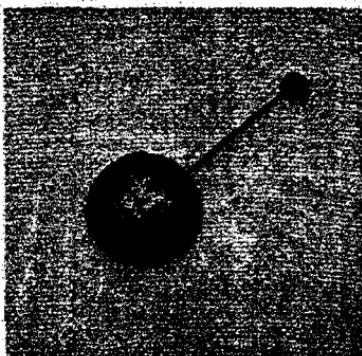


П.Куто

НАБЛЮДЕНИЯ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД



Paul Couteau

Astronome titulaire

**L'OBSERVATION
DES ÉTOILES
DOUBLES
VISUELLES**

suivie d'un catalogue de 744 étoiles doubles
pour tous instruments

Préface de Jean-Claude Pecker

П.Куто

НАБЛЮДЕНИЯ ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Перевод с французского
д-ра физ.-мат. наук
А. М. Черепашкука

Издательство «Мир»
МОСКВА 1981

Книга французского астронома Поля Куто — небольшое по объему, но содержательное пособие по наблюдениям визуально-двойных звезд, вычислению их орбит, масс и динамических параллаксов. Цель автора — описать увлекательный мир двойных звезд и привлечь к их наблюдениям астрономов-профессионалов и любителей. Ценным дополнением к книге является каталог 744 визуально-двойных звезд, наиболее удобных для наблюдений.

Книгу с пользой для себя прочтут астрономы всех специальностей, астрономы-любители, преподаватели астрономии в средней школе, члены астрономических кружков.

*Редакция литературы по космическим исследованиям,
астрономии и геофизике*

1705060000

20605-090
К 041(01)-81 90-81 ч. 1

© 1978 Flammarion, Paris

© Перевод на русский язык, «Мир», 1981

От переводчика

Книга французского астронома Поля Кутю уникальна в двух отношениях. Во-первых, это монография, подводящая итог многолетнего труда известного наблюдателя и исследователя визуально-двойных звезд, книга, в которой собраны последние результаты и достижения, накопленные в этой области астрономии. Во-вторых, это своеобразная программа будущих наблюдений, что делает ее настольной книгой любого исследователя визуально-двойных звезд, особенно начинающего.

Поразительные успехи современной астрономии, связанные в основном с применением новых методов наземных и внеатмосферных наблюдений, не должны заслонять тот факт, что в основе наших знаний о Вселенной лежат сведения о звездах, важнейшие характеристики которых: массы, светимости, радиусы — получаются главным образом из анализа наблюдений двойных звезд. Автор книги берет на себя благородную задачу — пробудить у молодых астрономов-профессионалов и увлеченных любителей астрономии интерес к этой классической и в то же время фундаментальной и всегда актуальной области наблюдательной астрономии.

Изложенный в книге материал лежит на стыке таких различных областей астрономии, как астрофизика, небесная механика, астрометрия и звездная астрономия. Поэтому вполне понятно, с какими значительными трудностями научного, методического и популяризаторского плана столкнулся автор при написании книги. Поль Кутю блестяще справился с этой сложной задачей. При достаточной научной строгости и полноте изложения книга сохраняет живую непринужденность и простоту представления материала, что делает ее доступной и интересной не только для астрономов-профессионалов, но и для широкого круга любителей астрономии.

В качестве приложения автор дает каталог 744 визуально-двойных звезд, многие из которых доступны наблюдениям с небольшими любительскими телескопами. Трехбуквенные обозначения некоторых созвездий в каталоге несколько отличаются от общепринятых: Ага вместо Aqr, Аку вместо Aql, Сап вместо Cnc, С. Вг вместо CrB, Сог вместо Crv, Сра вместо Crt, С. Ve вместо CVn, L. Min вместо LMi.

При непосредственном участии автора в русском переводе исправлены незначительные опечатки французского издания, за что переводчик и издательство приносят автору искреннюю благодарность. Мы также благодарим П. Г. Куликовского за просмотр рукописи и ряд ценных замечаний.

Можно надеяться, что книга П. Кутю послужит дальнейшему развитию наблюдательной астрономии в нашей стране.

28 ноября 1980 г.

А. Черепашук

Предисловие

Предисловие обладает тем безмерным и редким достоинством, что оно дает его автору, даже если он является другом автора книги, неоспоримое право позволить себе вольность и написать несколько строк, не только чтобы в свободной манере представить читателю труд, прочитанный им с чувством симпатии, но и чтобы «протащить» несколько добавочных соображений, отсутствующих в книге. Таким образом, это предисловие будет в известной степени и *призывом* к читателю.

Книга Поля Кута излагает сначала историю открытия и измерений двойных звезд со времен Гершеля, который первым осознал, что компоненты пары находятся в орбитальном движении, до последних современных наблюдений, к сожалению, очень редких... Изложив элементы классической оптики, теорию дифракции и представления о разрешающей способности инструмента, необходимые для понимания поставленной задачи, автор описывает измерительные приборы и приводит обзор практических рецептов, которые позволяют решение проблемы—*a priori* отвлеченной и безликой — поставить на путь, ведущий к подлинному успеху и к накоплению материала, пригодного для дальнейшей обработки. Проблемы отождествления звезд особенно трудны. Сколько же ошибок совершают только из-за этого наблюдатели-новички, предоставленные сами себе?

Глава 6, посвященная расчетам орбит и звездных масс, придает книге особенно важное значение. Речь в ней идет не только о накоплении измерений в течение многих лет (периоды обращения двойных звезд нередко достигают десятков лет, а порой превосходят столетия). Речь также идет об использовании всего арсенала средств, включая тригонометрию, небесную механику и даже спектроскопию (лучевые скорости, определяемые по эффекту Доплера—Физо, т. е. по смещению спектральных линий), для вычисления орбит, всех их элементов (период, длина осей, эксцентриситет, наклонение плоскости орбиты к лучу зрения, положение узлов и т. д.) и в особенности об использовании законов Кеплера для определения звездных масс. Известно, что подобные измерения являются единственным источником корректно определенных звездных масс и, кроме того, они составляют основу для необходимой калибровки всех иных измерений звездных масс, а также масс галактик во Вселенной. Окрестности Солнца — это область, где калибруются все законы, где устанавливаются величины эталонов, где апробируются все методы исследования Вселенной, в том числе ее наиболее удален-

ных областей... Итак, эти наблюдения, которые могут показаться трудными и нудными, остаются важным разделом астрономии и астрофизики наших дней.

Наконец, в последней главе (и в замечательном каталоге, который входит в нее как своеобразное заключение) мы вместе с автором совершаем путешествие в страну двойных звезд и знакомимся с результатами наблюдений прошлых лет и столетий.

А теперь, представив книгу, я хотел бы вспомнить о моих контактах с автором, установившихся более четверти века назад.

Надеюсь, Поль Куто не обидится на меня, если я поделюсь с читателем некоторыми своими воспоминаниями. Цель этих воспоминаний одна: ответить на вопрос, *как люди становятся наблюдателями двойных звезд?* Поль Куто, получивший солидное образование физика в университете и увлекшийся астрофизикой благодаря опыту любителя астрономии, которой он занимался с юношеских лет под небом Вандеи (более солнечным и ясным, чем обычно думают), поступил на работу в лабораторию Шацмана в Институте астрофизики Национального центра научных исследований несколькими годами позднее меня. Он работал в то время над диссертацией, объединявшей интересы Шацмана с предложенной в моей тогда еще незащищенной диссертации идеей применения механизма Шустера к образованию эмиссионных линий. Тема его диссертации: как объяснить существование линий поглощения в спектре белого карлика AC + 70°8247. Рабочая гипотеза была такова, что речь шла не о неотождественных линиях поглощения, а об интервалах между линиями излучения водорода — эти линии Бальмера, что было удивительно в то время, не наблюдались в поглощении, как в спектрах всех других белых карликов. Поля Куто удалось показать, что эффект Шустера и требуемые интенсивности эмиссионных линий будут иметь место, если допустить весьма высокие эффективные температуры, достигающие многих сотен тысяч градусов, а также большие ускорения силы тяжести. Конечно это решение предвосхитило открытие высоких температур у звезд в центре планетарных туманностей, но оно поставило много других проблем; более того, позднее благодаря дальнейшим успехам спектроскопии удалось четко отождествить спорные линии в спектре звезд. И многие годы спустя после защиты диссертации рабочая гипотеза Поля Куто, как и тысячи других гипотез в астрофизике, перешла в разряд гипотез, имеющих лишь «исторический» интерес.

Затем Поль Куто нас покинул — он перешел на вакантную должность в обсерваторию в Ницце. Андре Данжон, в то время президент Совета обсерваторий, со свойственной ему прямотой сказал Куто: «Вы претендуете на эту должность? Милости просим. Но имейте в виду, условия в Ницце тяжелые. Вы почти

наверняка будете один. Я рассчитываю, что Вы используете малый экваториал для изучения двойных звезд. Это нам совершенно необходимо». Поль Куто, которого нисколько не пугала перемена места, а работа в новой малоизвестной для него области скорее соблазняла, взял быка за рога и без колебаний и излишних оговорок отправился в Ниццу со всем снаряжением и багажом, один — вандеец, заброшенный в Приморские Альпы, под сень оливковых лесов Монт-Гро, в атмосферу, где все шло привычной чередой и которая постепенно засасывала лесистые еще холмы с разваливающейся обсерваторией.

Разумеется, он завел друзей среди своих коллег на обсерватории и в других местах и создал многочисленную семью при обстоятельствах, отчасти трагикомических.

Наконец, он привел в действие малый экваториал (носящий с тех пор название экваториала Шарлуа) и продолжал его усовершенствовать и улучшать с минимальными средствами и помощью. С этим инструментом он пронаблюдал многие известные двойные звезды и открыл новые пары, определил их орбиты, вычислил элементы орбит (с помощью допотопного арифмометра) и вскоре стал известен в мировых кругах наблюдателей двойных звезд. Он становится в один ряд с ван ден Босом, ван Бисбруком, Лейтеном и Жонкером, если говорить только о тех, кого уже нет с нами (другие выдающиеся наблюдатели упомянуты в гл. 1). Он, еще очень молодым, становится президентом Комиссии № 26 (Двойные звезды) Международного астрономического союза и по сей день остается одним из самых активных в мире наблюдателей двойных звезд.

Мне привелось снова встретить Поля Кута, когда, став директором обсерватории в Ницце в 1962 г., я имел возможность оказать достаточную финансовую поддержку, чтобы помочь этой области исследований и Полю Куту в частности, предоставив ему большой рефрактор обсерватории в Ницце, восстановленный заново, помимо экваториала Шарлуа, впрочем, уже полностью обновленного к тому времени.

Итоги своей долгой неутомимой деятельности наблюдателя Поль Куто подводит в этой книге, представляющей его труд на протяжении 30 лет. Разумеется, двойные звезды, с точки зрения большинства астрономов, нельзя отнести к одной из новомодных областей астрономической науки. И многие молодые исследователи предпочитают заниматься наиболее выигрышными с точки зрения защиты диссертаций проблемами, редко кто из них решает посвятить себя изучению двойных звезд. Однако лишь немногие астрофизики сознают, каким трудом добыты значения звездных масс, которые они используют. Ведь они редко принимают в своих расчетах массы, полученные путем прямого анализа орбиты двойной звезды, в основном им приходится иметь

дело со значениями, найденными на основе соотношения масса—светимость. Но не нужно забывать, что эта зависимость, хотя она и подтверждена (приближенно) теоретически, не может быть прокалибрована иначе, как с помощью прямых измерений двойных звезд! Часто, как упоминалось выше, нужны десятки лет наблюдений, чтобы надежно определить орбиту и массу звезды. Но эти годы являются годами фундаментальной, важной работы.

И я привел этот исторический пример, чтобы попытаться убедить наших молодых исследователей, во всяком случае тех, кто чувствует себя удобнее рядом с телескопом, чем рядом с компьютером, а также многочисленных любителей астрономии вновь обратиться к важной, но, к сожалению, заброшенной области астрономии. Несколько выдающихся наблюдателей двойных звезд еще активны, но ряды их редеют; Поль Кутю принадлежит к наиболее молодому поколению, смена которому не обеспечена; однако это одна из областей, наиболее сильно нуждающихся в наблюдениях, область, которая (вместе с определением параллаксов, собственных движений и т. п.) составляет предмет «позиционной астрометрии». Как бы я хотел, чтобы мой призыв был услышан!

Лучшее введение в эту область для потенциальных наблюдателей двойных звезд — книга Поля Кутю: она хорошо определяет в рамках общих астрофизических представлений современное состояние работ по двойным звездам. Эта книга основательная, простая и ясная, буквально «репортаж с места событий». Это труд, над которым многие из молодых должны были бы размыслить уже хотя бы потому, что теряется та страстная увлеченность, которая на протяжении целого века заставляла многих астрономов посвящать свою жизнь колоссальному труду по созданию каталогов, освоению техники и т. д. Как говорится, долгий и тяжкий труд. Труд астронома в самом высоком смысле этого слова, который каждый вечер приводит наблюдателя в башню его телескопа к одним и тем же звездам, чтобы повторять десятки раз одни и те же измерения, нудные и в то же время воодушевляющие... На протяжении десятков лет, каждую ясную ночь... Который снова и снова приводит его в башню, открытую в бесконечность ночи, к его микрометру, окулярам и таблицам, звездным часам и журналу наблюдений, освещаемому слабым светом карманного фонарика, чтобы записать измерения... Который приводит его в башню, открытую в бесконечность звездной ночи. В шерстяной шапке, неуклюзиях рукавицах, стеганых брюках, совсем одного с восхищенным взором астронома...

Жан-Клод Пекер

Член Французского института
профессор Колледж де Франс

Предисловие автора

Эта книга адресована всем, кто любит астрономию, и особенно тем, кто интересуется наблюдениями двойных звезд. Она адресована не только молодым начинающим любителям, которые только что обзавелись небольшим телескопом, но и молодым сотрудникам обсерваторий, которые перепробовали несколько дисциплин, прежде чем сделать свой выбор, а также астрономам-профессионалам, которые найдут в книге точные данные на современном уровне.

Таким образом, книга доступна всем. Это пособие, которого мне так не хватало, когда я сам приступал к изучению двойных звезд в 1961 г. Об этих объектах написано много, но несмотря на многочисленные статьи, во Франции отсутствует хорошее пособие по данной проблеме. Поэтому до последнего времени начинающим профессионалам было трудно составить ясное представление о состоянии и развитии этого раздела астрономии.

Наблюдения двойных звезд очень привлекательны: для любителя неба — тем зрелищем, которое они дарят, для профессионала — теми проблемами, которые они ставят перед ним. Чтобы пробудить призвание, нужно передать свою страстную увлеченность, т. е. показать пути своего поиска и его итоги, которые в свою очередь служат отправной точкой для последующих исследований. В этом состоит цель книги.

Эта книга совсем не похожа на другие издания, она не претендует на полноту и в основном общедоступно излагает результаты моих наблюдений и исследований в течение четверти века.

Своей специализацией в области изучения двойных звезд я обязан прежде всего Андре Данжону, в то время директору Парижской обсерватории. Мне предстояло вернуть к жизни старый, но мощный экваториальный обсерватории в Ницце, несколько заброшенный во время войны. Огромный рефрактор с фокусным расстоянием 18 м, четвертый в мире, с которым я был знаком благодаря трудам аббата Моро, был давно предметом моего восхищения. Когда читаешь то, что написал Фламмарион в 1882 г. о рефракторах с объективом 108 мм, которые «позволяют убедиться собственными глазами почти во всех открытиях современной астрономии», то что же говорить тогда о рефракторе в Ницце, в семь раз большем!

Этот инструмент, который теперь стал мне родным, ожидал меня в Ницце, и благодаря ему я чувствовал, что сумею осущест-

вить мечту своего детства: увидеть собственными глазами светила, которые еще никто не видел.

Мне повезло: меня ввел в курс дела Жонкер, последний из основоположников изучения двойных звезд, приступивший к наблюдениям еще в начале века, а примером мне служили два моих тезки: Поль Бэз и Поль Мюлдер. Судьба продолжала мне улыбаться: в моем распоряжении был один из четырех 38-сантиметровых французских телескопов, на смену которому пришел 50-сантиметровый телескоп. Этим мы обязаны проницательности Данжона. Наконец, в 1969 г. осуществилась¹ моя заветная мечта — усилиями Пекера завершилась реставрация большого рефрактора.

Книга делится на восемь глав. Каждая из них посвящена отдельной теме, причем предполагается, что читатель не знает содержания предыдущих глав. В конце каждой главы можно найти краткий список цитированных источников.

Наблюдения двойных звезд связаны с именами конкретных ученых, кроме того, история развития этой области очень важна для понимания ее современного состояния. Это предмет гл. 1.

Затем приводятся несколько очень простых понятий из оптики, которые обычно легко забываются. Двойную звезду нельзя наблюдать как планету или переменную звезду. Как увидеть, что звезда двойная, если ее компоненты очень близки? Физиология зрения наблюдателя и теория построения изображения в сочетании друг с другом должны приводить к благоприятному результату. Вся проблема определения звездных масс зависит от этого.

Далее рассмотрены различные измерительные приборы, по крайней мере те, которые служили или служат для наблюдений. Мы подробно остановились на нитяном микрометре, на котором выполняется 90 % всех измерений и принцип которого насчитывает много веков. Менее подробно описаны методы современной интерферометрии и лунных покрытий, которые открывают поистине революционные перспективы.

Затем я даю ряд практических советов: приготовления к наблюдениям, меры предосторожности, необходимые при обращении с телескопом, искажение изображений и его предотвращение, движения наблюдателя во время наблюдений, нужные и лишние.

Отдельная глава посвящена отождествлению звезд. Этот метод постепенно устаревает, как и визуальные наблюдения. Конечно, астрономы привыкли измерять объекты на фотографиях, где они находят сотни звезд. Но задача определения положения единственной звезды, видимой в окуляр, несколько иная. С этим связана история звездных каталогов, которую я постарался изложить как можно лучше.

Классическая глава, посвященная вычислениям орбит и масс

звезд, предназначена главным образом для студентов. Я описы-ваю только три метода вычисления орбиты, из которых один, самый быстрый, позволяет получать элементы орбиты за не- сколько минут. Здесь же можно найти таблицу масс, тщательно приведенную к современным данным и снабженную коммента-риями. Глава заканчивается описанием метода определения динамических параллаксов. Этот раздел не претендует на полноту, хотя в нем содержатся все основные сведения,— в противном случае книга была бы слишком объемистой. Расчеты основаны на простых понятиях небесной механики. Читатель здесь найдет все необходимое, собранное и унифицированное впервые во Фран-ции, для определения масс отдельных звезд с момента расчета орбит по соответствующим наблюдениям до вычисления динами-ческого параллакса центра масс пары. Каждый раз все этапы расчета иллюстрируются численными примерами.

Эти классические понятия и результаты использованы в сле-дующей главе, где описано путешествие в страну двойных звезд. Я здесь излагаю результаты исследований, выполненных мною в Ницце, в образной форме, доступной тем, кто имеет элементар-ные знания по астрономии и математике. Даже просто любозна-тельный читатель, прочтя ее, поймет, как организуются иссле-дования. Где находятся двойные звезды? Как они видны вооб-ражаемым обитателям этих систем? Как далеко в глубины Все-лennой может проникнуть телескоп? Я отвечаю на эти вопросы, описывая то, что мы сделали в Ницце. Десятилетний труд Мюл-лера и автора завершился открытием более 2000 двойных звезд. Я подразделяю эти звезды на гиганты и карлики и выбираю те из них, которые надо наблюдать каждый год, которые близки к нам и изучение которых позволит лучше узнать их строение.

Наконец, книга заканчивается необходимым дополнением — каталогом двойных звезд. Он предназначен для всех — от от-дельных наблюдателей, располагающих простым биноклем, до организаций, оснащенных мощными инструментами. Он состав-лен так, чтобы каждую ночь наблюдатель мог выбрать то, что ему подходит. Я ограничился звездами, достаточно яркими, которые легко найти на небе. Я особенно позаботился о тех, у кого инструменты не имеют экваториальной монтировки.

Как бы мне хотелось пробудить у своих читателей интерес к наблюдениям двойных звезд или лучше — увидеть рождение призываия наблюдателя, в котором так нуждается астрономия!

Я признателен Жан-Клоду Пекеру, профессору Коллеж де Франс, за честь, которую он оказал мне, написав предисловие к книге. Благодаря ему обсерватория в Ницце пережила в 1963 г. второе рождение, и когда он нас покинул шесть лет спустя, два больших рефрактора с объективами диаметром 50 и 76 см, свидетели нашего сотрудничества, позволили Ницце занять одно из ведущих мест в визуальных наблюдениях.

Глава 1

ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Двойные звезды во Вселенной

Вселенная состоит в основном из звезд и газопылевых облаков. Звезды представляют собой горячие тела, содержащие преимущественно водород; они образуются в результате деления и сжатия газовых облаков под действием сил гравитации и излучения. Повышение давления, порождаемое сжатием, приводит к сильному увеличению температуры газа. Фаза собственно звезды наступает с момента начала реакций ядерного синтеза в ее недрах, которые обусловливают собственное излучение звезды.

Звезды имеют самые разнообразные размеры. Солнце, типичная звезда, насчитывает более миллиона километров в диаметре, так что система Земля—Луна полностью поместились бы внутри его. Некоторые звезды имеют размеры в тысячи раз большие, другие — в тысячи раз меньшие, чем Солнце. Диапазон звездных масс более узок: от $1/20$ до 40 масс Солнца, которое содержит в себе в 300 000 раз больше вещества, чем Земля.

Глубоко в недрах Солнца водород превращается в гелий с ежесекундным расходом 560 миллионов тонн. По сравнению с полной массой Солнца это ничтожное количество, поэтому запасы водорода обеспечивают горение в течение миллиардов лет, но энергия, освобождаемая при этом превращении, наиболее существенна для Солнца как звезды. Выделяемая мощность достигает 500 000 миллиардов миллиардов лошадиных сил и постепенно переносится в приповерхностные слои, в которых она поддерживает температуру, близкую к 5700 К; благодаря этому каждый квадратный сантиметр солнечной поверхности, которая превосходит поверхность Земли более чем в 10 000 раз, излучает в пространство мощность 10 лошадиных сил. Некоторые звезды излучают в 300 000 раз сильнее, например S Золотой Рыбы, другие в 5000 раз слабее, например Проксима Центавра.

Звезды группируются в гигантские системы, называемые галактиками. Это плоские, часто спиральные образования, называемые иногда по этой причине спиральными туманностями.

Размеры галактик таковы, что свет, распространяющийся со скоростью 300 000 км/с, пересекает их за сто тысяч лет. В типичной галактике насчитывается примерно сто миллиардов звезд.

Наше Солнце входит в одну из таких систем, называемую Галактикой. Оно находится на расстоянии 28 000 световых лет от центра, практически в плоскости симметрии системы. Центр Галактики лежит в созвездии Стрельца, хорошо видимом в наших широтах летними вечерами на юге. Млечный Путь есть не что иное, как свечение множества звезд, составляющих Галактику.

Звезды в галактиках не являются неподвижными, они врашаются в общем гравитационном поле вокруг центра системы со скоростью тем большей, чем ближе они к ее центру. Таким образом, Солнце увлекает нас в своем вечном обращении вокруг галактического центра, но соседние звезды также участвуют в этом движении, поэтому оно долго оставалось незамеченным, несмотря на то что скорость этого движения близка к 200 км/с.

Свету требуется четыре года, чтобы преодолеть среднее расстояние, разделяющее две звезды в наших окрестностях. Таким образом, звезды очень удалены друг от друга. Уменьшенные до размеров теннисного мяча, звезды отстояли бы друг от друга на расстояние около 3500 км. Скорость их относительного движения — порядка диаметра в сутки; отсюда видно, что столкновения звезд практически невозможны.

Наблюдения показывают, что очень часто звезды объединены в пары, такая пара называется двойной звездой. Оба компонента пары сильно притягиваются друг к другу, но сила притяжения уравновешивается центробежной силой вращения. Это приводит к орбитальному движению вокруг центра масс, подобному движению Луны в системе Земля—Луна и планет в Солнечной системе. Скорость этого движения и форма орбиты несут информацию о массах небесных тел, поэтому исследования двойных звезд очень важны.

Наше Солнце является одиночной звездой. Кортеж планет, сопровождающих его, был бы невидим астрономам, ведущим наблюдения от близких звезд. А вот наша соседка α Центавра, во всех отношениях подобная Солнцу, даже по возрасту и по размерам, является двойной. Ее спутник — звезда, в два-три раза меньшая,— располагается на расстоянии, которое свет проходит за четыре-пять часов.

Эти системы, вероятно, образовались одновременно с рождением составляющих их звезд в результате сжатия первоначального газового облака и его турбулентной фрагментации. Следовательно, изучение двойных звезд важно для космогонии.

Двойные системы весьма разнообразны. Существуют пары, в которых звезды настолько близки друг к другу, что их поверх-

ности почти соприкасаются. Приливное взаимодействие в таких системах приводит к тому, что компоненты приобретают форму эллипсоидов и с их поверхностей вещество перетекает с одного компонента на другой или даже постепенно выбрасывается за пределы системы. Периоды обращения таких систем очень короткие — порядка нескольких часов. Систем такого типа известно много: например, система γ Большой Медведицы состоит из двух почти одинаковых звезд, которые обращаются вокруг друг друга с периодом 8 часов. Расстояние между их центрами составляет по крайней мере 2 млн. км, а поверхности почти соприкасаются. Двойственность этих систем обнаруживается путем анализа испускаемого ими света с помощью спектрографа, а также путем изучения взаимных затмений, вызывающих переменность их блеска, подобно тому, например, как это наблюдается у звезды Алголь. Расстояние между компонентами в таких системах слишком мало, чтобы можно было видеть две звезды раздельно. Эти системы носят название спектрально-двойных или фотометрических (или затменных) двойных, в зависимости от того, производится ли их изучение с помощью спектрографа, который разлагает свет в спектр, или с помощью фотометра, который позволяет изучать изменения блеска, связанные с взаимными затмениями компонентов.

Когда два компонента двойной звезды разделены сильнее, на расстояние в несколько сотен их радиусов, их можно разрешить в телескоп. В этих случаях их называют визуально-двойными. Наблюдатель может непосредственно исследовать движение звезд по их орбитам, хотя на проведение такого исследования требуются годы, а часто и столетия наблюдений. Он наглядно убеждается, что закон тяготения Ньютона универсален. Он замечает в то же время, что законы Кеплера, которые выводятся из закона Ньютона и управляют движением планет Солнечной системы, применимы и к звездным системам, находящимся на таких далеких расстояниях, на каких мы еще можем их разрешить. Это счастливое обстоятельство — возможность наблюдать двойные звезды — иллюстрирует нам универсальность законов физики и позволяет, кроме того, сравнивать массы звезд.

Иногда две звезды системы одинаковы, как, например, в случае системы γ Девы, иногда же компоненты очень непохожи друг на друга, как это имеет место в системе Сириуса или α Большой Медведицы. Бывает даже, что один компонент системы невидим. Он выдает свое присутствие, вызывая аномалии в движении главной звезды. Такие системы называются астрометрическими двойными. Изучение пар, состоящих из различающихся компонентов, называемых главной звездой и спутником, дает информацию об эволюции звезд. За длительное время эволюции звезды истощают запасы ядерной энергии, что приво-

дит к изменению их внутреннего строения. Однако старение происходит с разной скоростью для звезд разных масс, следовательно, звезды в системе эволюционируют с разной скоростью. Изучение двойных звезд позволяет, таким образом, астроному и физику вплотную подойти к проблемам, связанным с такими загадочными объектами, как звезды.

Итак, двойные подразделяются на несколько типов в зависимости от метода наблюдений. Иногда одну и ту же систему можно отнести одновременно к нескольким типам. Например, α Центавра является визуально-двойной и в то же время спектрально-двойной и парой с невидимым спутником. Мы будем изучать в данной книге исключительно визуально-двойные звезды, поскольку другие типы двойных исследуются совсем иными методами, мало доступными любителям. Тип двойной определяется в основном расстоянием между компонентами и наклонением плоскости орбиты системы по отношению к лучу зрения наблюдателя. Очень тесные системы, компоненты которых находятся почти в соприкосновении, имеют очень большие относительные скорости и дают сильно смещающиеся вследствие эффекта Доплера — Физо спектральные линии, кроме того, в этих системах велика вероятность обнаружения затмений. Напротив, если расстояние между компонентами системы достаточно, чтобы их можно было наблюдать раздельно, то их относительные скорости меньше и пара не доступна изучению с помощью спектрографа.

На небе наблюдаются двойные системы всех размеров вплоть до пар, расстояние между компонентами которых столь велико, что их взаимное притяжение очень слабо и притяжение соседних звезд может разрушить систему. Естественно, не все двойные доступны наблюдениям, в то время как многие еще предстоит открыть. Наконец, существуют случайные объединения звезд, когда кажется, что звезды образуют пару вследствие эффекта проекции двух физически не связанных объектов. Такие пары называются оптическими. Их число мало по сравнению с физическими двойными звездами.

Практическая значимость наблюдений двойных звезд

Двойные звезды настолько разнообразны и распространены, что их можно наблюдать в любой инструмент, даже в простой театральный бинокль. Естественно, чем мощнее инструмент, тем больше можно наблюдать двойных звезд. Поскольку число известных пар возрастает непрерывно, оно уже превосходит 60 000. Тщательно просматривая небо и исследуя звезды одну за другой на больших телескопах с сильными увеличениями,

астрономы все еще находят двойные системы. И каждая из них вносит свой вклад в изучение природы звезд.

Ко времени изобретения телескопа в начале XVII в. не были известны ни расстояния до звезд, ни их размеры. Понятие двойной звезды не является современником Галилея, первого астронома, вооруженного телескопом. Первая открытая звездная пара — это Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы, компоненты которой имеют почти одинаковый блеск и отстоят друг от друга на 14''. Эта система наблюдалась Риччоли в 1650 г., 41 год спустя после первых телескопических наблюдений Галилея. Несколько годами позже, в 1656 г., Гюйгенс открывает Трапецию Ориона — кратную систему, состоящую из шести компонентов. Однако эти неожиданные открытия не заставили ученых задуматься о двойных звездах, так же как и открытие затменной двойной звезды Алголь в 1669 г., сделанное Монтанари. Они приписывали их близость эффекту перспективы. Истинная природа Алголя, системы из двух различающихся звезд, которые затмеваются каждые 48 часов, была установлена два века спустя.

Как мы увидим ниже, первый астроном, который стал рассматривать двойные как физические системы и приступил к их поискам более века спустя после Галилея, был Вильям Гершель.

Наблюдения визуально-двойных всегда живо интересовали большое число астрономов — любителей и профессионалов. Даже астроном-профессионал с многолетним опытом наблюдений не остается равнодушным к тому зрелищу, которое демонстрируют эти объекты в поле зрения его инструмента. Интерес исследователей не ограничивается только зрелищем, даже когда речь идет о паре, разрешимой лишь большими инструментами. Интерес здесь представляет прежде всего изучение взаимного движения компонентов пары вокруг общего центра масс, что позволяет по истечении некоторого промежутка времени определить орбиту одной звезды по отношению к другой.

Двойные звезды так разнообразны и многочисленны, что даже для самых маленьких телескопов имеется большой выбор объектов. В небольшой телескоп изображения всегда кажутся четкими и стабильными, что весьма редко достигается с большим инструментом. Наблюдения двойных позволяют судить о качестве объектива; некоторые пары, например такие, как Антарес в созвездии Скорпиона или ё Волопаса, являются трудно наблюдаемыми парами. Большое достижение — различить эти пары в маленький телескоп с объективом диаметром 7 см. С несколько большим объективом, например 10 см в диаметре, выбор объектов становится богаче. Такие пары, как ѕ Волопаса, компоненты которой имеют одинаковый блеск и отстоят друг

от друга на 1,1'', являются мирами для контроля качества инструмента. Некоторые пары, компоненты которых сильно различаются по своему блеску, такие, как Сириус и его спутник, который в 10 000 раз слабее, доступны лишь мощным инструментам, но могут быть наблюдаемы и с телескопами скромных размеров. Например, спутник Сириуса наблюдался в Ницце с телескопом 10 см диаметром, хотя его трудно наблюдать даже в очень большие инструменты.

Тот, кто начинает наблюдать двойные звезды, быстро увлекается этими исследованиями и постепенно переходит к объектам, все более трудным и интересным для изучения. Для этих наблюдений особенно важны качества наблюдателя. Бернхем в США и Жонкер во Франции открыли с помощью скромных любительских средств двойные звезды, которые было бы очень трудно обнаружить даже со значительно более мощными инструментами.

Впрочем, зрелище, показываемое двойными звездами, яркими и имеющими разные цвета, было описано такими авторами, как Араго и Фламмарион. Они изобразили это явление в прошлом веке с большим искусством и очень увлекательно в научно-популярных книгах по астрономии.

Эти астрономы с помощью энергичных наблюдателей популяризовали идею необходимости постройки больших телескопов и стимулировали их создание на средства богатых меценатов, оказав таким образом большую услугу астрономии в целом. Именно популяризации сведений о двойных звездах обязан своим появлением большой рефрактор с объективом диаметром 91 см, строительство которого финансировал Лик в Калифорнии, рефрактор с объективом 69 см в Блумфонтейне, финансированный Лямонтом, и в меньшей мере рефрактор с объективом 101 см обсерватории Йеркса и 76-сантиметровый рефрактор обсерватории в Ницце, построенный Бишофсхаймом.

Мы не будем здесь описывать всю историю изучения двойных звезд. Это уже сделано ранее многими авторами, такими, как Бэз (1930), Эйткен (1935) и Хейнц (1971). Мы остановимся на важнейших фактах и на современной истории вопроса, от которых зависят наши знания о звездных парах.

В этой области исследований история является важной, поскольку данные, необходимые для построения орбит двойных звезд, часто восходят в очень далекое прошлое, иногда используются наблюдения, выполненные более столетия назад. При этом важно знать, какие астрономы, какими средствами наблюдали пары, орбиты компонентов которых мы вычисляем в настоящее время. Старые наблюдения очень ценные, течение времени умножает их научную ценность.

Предшественники. Отец и сын Гершели

Первым к «переписи» двойных звезд приступил в 1776 г. сэр Вильям Гершель (1738—1822). Эта работа явилась побочным результатом попыток измерений звездных параллаксов путем сравнения положения главной звезды с положением ее более слабой соседки, при этом предполагалось, что последняя расположена много дальше почти на том же луче зрения. Этот остроумный метод, предложенный Галилеем, позволяет исключить ошибки, обусловленные прецессией, нутацией и рефракцией, а также множество инструментальных ошибок.

Вильям Гершель наблюдал с телескопами собственного изготовления с зеркалами 50 см и 1,3 м в диаметре, сделанными из бронзы. Эти инструменты, наиболее мощные для своего времени, позволили ему успешно выполнить знаменитые подсчеты звезд, работу, которая в то время была малопопулярна на национальных обсерваториях, занятых измерениями положений светил для целей навигации и картографии. Зеркала, обработанные с максимальной тщательностью, давали хорошие круглые изображения, но монтировки были азимутальными и малоудобными для наблюдений. Наблюдатель следил за звездой глазом, иногда без окуляра, с одного края поля зрения до другого и, перемещая телескоп вручную, заставлял звезду много раз пересекать поле зрения. Он располагал только грубым микрометром, не допускающим точных измерений. Кроме того, в те годы теория звездных изображений не была еще разработана, она была развита лишь в 1850 г. Эри. В то время думали, что видимый диаметр изображения зависит от увеличения и блеска. Основная масса измерений двойных звезд была выполнена Гершелем путем сравнения расстояния между звездами с оценкой размера звездного диска. Эти наблюдения сами по себе имеют небольшое научное значение, но временной интервал в два века делает их тем не менее очень цennыми.

Гершель понял, что наблюдаемые движения обусловлены не параллаксом, а орбитальными движениями в звездных системах. В начале XIX в. он публикует записки, в которых описывает первые орбиты объектов за пределами Солнечной системы, в частности движения Кастора и γ Девы. Поэтому история изучения двойных звезд берет свое начало с первых попыток определения звездных параллаксов.

Сэр Джон Гершель (1792—1871), сын Вильяма Гершеля, предпринял изучение двойных звезд начиная с 1816 г. совместно с сэром Джеймсом Саутом в северном полушарии, затем в южном полушарии на мысе Доброй Надежды. Их результаты — три тысячи звездных пар — имеют большое историческое значение,

поскольку они демонстрируют важность исследования двойных для науки, кроме того, эти результаты стимулировали дальнейшие поиски в этом направлении.

Первые представители современной эпохи. Отец и сын Струве

Если Гершели были инициаторами, то их истинный последователь В. Я. Струве (1793—1864) является пионером современной астрономии двойных звезд. Работая на обсерватории в Дерпте (ныне Тарту), Струве впервые имел в своем распоряжении телескоп на экваториальной монтировке (1824 г.), снабженный часовым механизмом и нитяным микрометром. Этот телескоп-рефрактор с объективом диаметром 24 см, изготовленным Фраунгофером, был наиболее мощным для того времени. Этот инструмент является прообразом современных астрономических рефракторов.

С этим инструментом В. Я. Струве открыл 3134 звездные пары. Нужно было дополнить эти открытия точными измерениями положений объектов на небе. Такие измерения не были сделаны Гершелями; занятые разнообразными работами, они оставили национальным обсерваториям тяжелую задачу — создание каталогов положений звезд. Струве, находясь во главе большого, хорошо оснащенного астрономического учреждения, считал себя обязанным заполнить этот пробел. В то время на меридианных кругах можно было точно измерять только положения наиболее ярких звезд. Каждая открытая двойная звезда была новым объектом без предварительного отождествления. Необходимо было прежде всего знать ее точное положение на небе.

Поэтому В. Я. Струве публикует свои результаты в трех фундаментальных сочинениях, написанных по-латыни:

Catalogus novus stellarum duplicitum (1827) (Каталог новых двойных звезд), дающий список двойных с их приближенными положениями и краткими описаниями.

Stellarum duplicitum et multiplicitum mensurae micrometricae (1837) (Двойные и кратные звезды, измеренные микрометрически), в котором приведено подробное описание измерений звездных пар.

Positiones mediae (1852) (Средние положения), в котором даны точные положения, измеренные с меридианным кругом.

Метод работы В. Я. Струве отличается от методов его предшественников. Его инструмент, снабженный часовым механизмом, освобождал от огромных усилий, связанных с ручным слежением за светилом и понижающих остроту зрения. Именно поэтому такие объекты, как спутник Сириуса, не были открыты

Гершелями к 1815 г., хотя с объективами, которыми они располагали, было замечено множество пар.

Струве наблюдал до 400 объектов в час. Это очень быстрый темп, поскольку ему нужно было в среднем девять секунд, чтобы навести телескоп на звезду с помощью искателя, подвести к центру поля зрения и отнаблюдать с соответствующим увеличением. Его цель состояла в том, чтобы выполнить обзор наибольшей возможной области неба. В течение трех лет он пронаблюдал 120 000 объектов, среди которых одна двойная звезда приходилась в среднем на 38 одиночных.

В 1839 г. В. Я. Струве основал Пулковскую обсерваторию около Санкт-Петербурга и там установил рефрактор с объективом 38 см, с которым его сын Отто (1819—1905) продолжил труд своего отца, открыв более 500 пар, измерения которых были опубликованы в 1843 и 1850 гг. Кроме того, он выполнил многочисленные наблюдения объектов, занесенных в «Новый каталог двойных звезд».

Этот телескоп превосходил первый крупнейший рефрактор с диаметром объектива 24 см и только спустя 27 лет уступил первенство рефрактору с диаметром объектива 47 см Дирборнской обсерватории в Чикаго. Но эти инструменты Дерптской и Пулковской обсерваторий послужили моделями для гигантских рефракторов Европы и Америки конца XIX в.

Работы отца и сына Струве имеют большое значение благодаря им более чем вековой давности, поскольку 23 % орбит звезд, известных в настоящее время,— это орбиты систем, открытых ими.

После этих первых исследований в Пулково история двойных звезд тесно связана с историей крупных телескопов.

Эпоха великих пионеров

В 1873 г. начинается эпоха великих американских пионеров с первых открытий Бернхема (1838—1921). Этот астроном-любитель быстро приобрел мировую известность, открыв свои первые звездные пары на инструменте с диаметром объектива 15 см. Общее число открытых им пар составляет 437. Он работал также с телескопом Дирборнской обсерватории, упомянутым выше, и открыл 409 пар в сотрудничестве с Хоком, который открыл 622 пары.

Его талант наблюдателя и энтузиазм можно сравнить с талантом и энтузиазмом Ловелла и Скиапарелли, которые верили в возможность открытия жизни на Марсе и написали книги о марсианских инженерах. Этот энтузиазм заражал и меценатов, которые, возможно, пресытившись обыденными человеческими

проблемами, финансировали создание больших европейских и американских телескопов. Бернхем работал на Ликской обсерватории (248 пар на большом рефракторе), на Йеркской обсерватории (61 пара), в Вашингтоне (14 пар с рефрактором 66 см), Уошбернской обсерватории близ Чикаго (87 пар с рефрактором 39 см), собрав в общей сложности данные о 1336 двойных звездах.

Бернхем искал свои пары несколько случайным образом. Он имел привычку проверять звезды по соседству с теми, которые измерял, открывая таким образом путь к более систематическим исследованиям двойных.

В начале XX в. Бернхем составил обширный каталог, включивший все известные к тому времени двойные звезды. Этот замечательный труд — *A General Catalogue of double stars within 120° of the North Pole*, — опубликованный в 1906 г., содержит измерения, отождествления, библиографию и множество примечаний по каждой звезде; общее число пар в нем составляет 13 665. Этот труд является образцом ясности изложения, полноты информации и тщательности проверки сведений о двойных звездах. Автор уточнил, выполнив наблюдения на телескопе, все данные, которые казались ему сомнительными и неполными.

После 1901 г. Бернхем не занимается более поисками новых пар, но проделывает огромную работу на большом Йеркском рефракторе; с 1907 по 1912 г. он выполняет 9500 наблюдений широких пар для уточнения их собственных движений.

Своими работами Бернхем показал, что проблема поиска визуально-двойных звезд еще далека от завершения. На мощных американских телескопах, располагая подробными звездными каталогами, можно было приступить к систематическим поискам двойных звезд. Для таких работ есть два метода: либо составлять звездные карты по каталогам, полным до определенной звездной величины, либо переходить непосредственно от каталога к небу. Так Эйткен (1864—1951) и Хасси (1862—1926) составили карты неба до звездной величины 9,0 и 9,1^m с помощью каталогов *Astronomische Gesellschaft* и проводили обзор неба, обследуя звезду за звездой.

Наблюдения начались осенью 1899 г. и выполнялись на двух телескопах с диаметрами объективов 30 и 91 см Ликской обсерватории. Малый инструмент, более легкий в управлении, позволял пронаблюдать большее число звезд за час наблюдений. Более одной трети пар, открытых на Ликской обсерватории, было обнаружено с помощью малого инструмента, но почти все они были измерены на большом инструменте. К сожалению, ни Эйткен, ни Хасси не указали зоны, исследованные с каждым из этих телескопов, за исключением полярной области севернее склонения 60°, которая наблюдалась только на малом телескопе.

Таким образом, важные области неба не были исследованы с телескопом, имеющим апертуру больше 30 см. Этим в основном объясняется большое число новых пар, открытых в настоящее время.

За 5 лет этими двумя наблюдателями были открыты 2000 пар. Но Хасси был назначен на пост директора обсерватории Анн-Арбор (Мичиган), и Эйткен продолжил работу один. Поиски закончились к 1915 г. с общим итогом 4000 двойных звезд, в основном трудных для исследования. Значительная часть этих двойных имеет короткие периоды обращения.

Хасси, занятый своими новыми обязанностями, не прекратил исследований двойных звезд. На обсерватории Ла-Плата, связанной с Мичиганским университетом, он открыл на южном небе 300 пар с телескопом апертурой 43 см в период с 1912 по 1914 г. Затем он с головой ушел в организацию установки 69-сантиметрового телескопа обсерватории Блумфонтейн, которая носит имя Ламонта—Хасси (первый — меценат, второй — исследователь). Хасси намеревался вернуться к поискам двойных звезд, но у него случился сердечный приступ за несколько дней до открытия обсерватории (в октябре 1926 г.).

Европа также не оставалась пассивной. Эспин (1858—1934) в Англии на своей частной обсерватории Тау-Лоу на телескопах с диаметрами объективов 45 и 60 см, Жонкер (1889—1974) в окрестностях Лилля (рефрактор диаметром 33 см), затем в Гринвиче (рефрактор диаметром 71 см) открывают еще около 4000 двойных методом прямого обзора неба. Но эти пары, открытые с менее мощными инструментами, статистически менее интересны, чем открытые в Калифорнии или в Чикаго, поскольку немногие обнаруживают орбитальные движения со времени их открытия (теперь уже довольно давнего). В 1917 г. Жонкер публикует каталог всех открытых двойных звезд и их измерений со времен Бернхема.

Таким образом, к 1925 г. накопилось большое число наблюдений двойных звезд, что привело к необходимости создания нового общего каталога. Начатый Дулиттлом, он был закончен и опубликован Эйткеном в 1932 г. под заглавием *New General Catalogue of double stars within 120° of the North Pole*. Это двухтомное издание содержит 17 180 объектов и дает для каждой пары дополнение, содержащее измерения, выполненные со времен каталога Бернхема. Несмотря на то что с его выхода прошло уже много времени, этот каталог по сей день служит настоящей книгой наблюдателей, поскольку с тех пор не было издано новых общих каталогов двойных звезд.

Современные изыскания

За исключением работ Эспина и Милберна в Англии, которые продолжались до 1930 г., обзорные исследования на северном небе прекратились в 1918 г., и астрономы решили, что «перепись» визуально-двойных звезд практически завершена. Жонкер, не колеблясь, написал во введении к своему каталогу 1917 г.: «Быстро́й рост числа вновь открытых двойных в этом году резко прекратился по крайней мере для звезд не слабее 9-й звездной величины. Все эти пары были проверены на Ликской обсерватории, и мало вероятно, чтобы значительное число звезд, двойственность которых не могла бы быть обнаружена с горы Гамильтона, будет открыто где-либо еще». Но автор при этом не говорит о том, что более трети неба было исследовано с рефрактором с диаметром объектива 30 см и оставались многочисленные пары, доступные для открытия даже с телескопами средних размеров.

Начиная с 1920 г. благодаря успехам звездной классификации становится возможным классифицировать известные двойные по их спектральным классам, абсолютным звездным величинам (гиганты и карлики) и расстояниям от Солнца. Это побудило Койпера в 1934 г. заняться изучением двойных в зависимости от их астрофизических параметров. Он исследует ближайшие к Солнцу звезды на большом ликском рефракторе и открывает 117 пар. Некоторые из них, главным образом красные карлики, отличаются очень короткими периодами обращения, позволяя за несколько лет получить сведения о массах многих звезд.

Эта работа Койпера продемонстрировала, что мир двойных, особенно карликов, еще не полностью раскрылся перед наблюдателями — факт, отмеченный Бернхемом 30 годами ранее. Тогда Жонкер с 1941 по 1945 г. предпринял новые поиски двойных в Марселе на 80-сантиметровом рефлекторе с целью выявления слабых пар и нашел около 2000 таких пар. Список Жонкера содержит главным образом далекие гиганты с очень медленным орбитальным движением, причем угловое разделение этих звезд относительно велико, как, например, в случае пар, открытых Эспином.

Чтобы найти двойные, состоящие из карликов, нужно ограничить свои поиски звездами, принадлежность которых к классу карликов известна. Именно так поступил Уорли в 1960 г., исходя из списка звезд-карликов, найденных спектрофотометрическими методами Высоцким. Таким методом он нашел 30 пар, состоявших из красных карликов, из которых десяток обладает особенно быстрым орбитальным движением.

Эти исследования показали, что поиски двойных звезд еще далеки от завершения. Плодотворность поиска двойных звезд ограничивается качеством изображения, обусловленным атмос-

ферными условиями, в большей степени, чем мощностью инструмента. Некоторые трудно обнаружимые двойные, например с большой разностью блеска между компонентами, остаются незамеченными при средних атмосферных условиях, в которых часто вынужден работать астроном. Кроме того, в ходе обращения по орбите система в силу многих причин может казаться одиночной звездой даже при внимательном исследовании. Отсюда следует, что многие очень интересные двойные пока еще остаются неоткрытыми.

Это основное соображение, которым руководствовалась обсерватория в Ницце, предпринимая 10 лет назад новые поиски двойных звезд. Предварительный обзор на рефракторе апертурой 38 см звезд с большим собственным движением в зоне, исследованной Парижской обсерваторией, позволил сначала открыть 145 пар из 5250 просмотренных звезд. Столь обнадеживающие результаты побудили автора этой книги вновь обратиться к общим поискам двойных звезд с рефрактором апертурой 50 см, установленным в 1967 г., и рефрактором апертурой 74 см, реставрированным в 1969 г. Эти поиски, начатые со склонения $+17^\circ$, охватывают звезды каталога AGK3 в зонах от $+17$ до $+32^\circ$, а также звезды каталога Аргеландера (BD) к северу от склонения $+32^\circ$. Из 65 000 просмотренных за девять лет звезд 1500 оказались двойными. Мюллер на телескопе апертурой 50 см исследовал полярную область, обзор которой ранее выполнил Эйткен на Ликском 30-сантиметровом рефракторе. К северу от $+60^\circ$ обзор 24 000 звезд привел к открытию 550 двойных. Следовательно, с 1967 по 1976 г. в Ницце было открыто в общей сложности более 2000 пар. Как показали исследования, одна двойная звезда находится в среднем на каждые 50 одиночных. Эта пропорция замечательно постоянна как по склонению, так и по прямому восхождению. К 1976 г. область между Северным полюсом и склонением $+17^\circ$ была исследована на 65 %.

Эти ранее неизвестные двойные звезды, открытые в ночи с великолепным качеством изображения, являются в основном объектами, трудно разрешимыми даже в очень большие телескопы. Среди пар с малым разделением число пар, открытых в Ницце, значительно больше числа таких пар, известных ранее.

На обсерватории в Белграде поиски новых двойных звезд ведутся на рефракторе апертурой 65 см. С 1969 г. было открыто сто двойных.

Поиски на южной полусфере

Южная полусфера была исследована значительно позднее. После первых открытий Джона Гершеля в начале XIX в. на Капской обсерватории некоторое количество наблюдений было

выполнено в Сиднее, но только в конце века на южной полусфере были начаты наблюдения двойных звезд современными средствами.

Иннес (1861—1933) на Капской обсерватории с рефрактором апертурой 45 см открывает с 1896 по 1903 г. 450 двойных и публикует первый каталог (1899 г.) двойных к югу от экватора. В 1903 г. он был назначен директором обсерватории Иоганнесбурга, но лишь с вводом в строй в 1925 г. большого рефрактора апертурой 67 см ему удалось довести число открытых пар до 1600.

Этот инструмент, вслед за которым вступил в строй в 1928 г. рефрактор апертурой 69 см, обсерватории Ламонта—Хасси в Блумфонтейне, положил начало открытию большого числа двойных на южной полусфере. Ван ден Бос (1896—1974) и Финзен методом прямых наблюдений с использованием каталога открыли с 1925 по 1935 г. в Иоганнесбурге 3200 пар, в то время как Росситер и его сотрудники в Блумфонтейне с 1928 по 1946 г. методом составления карт открыли около 8000 двойных—поистине гигантский труд!

Можно утверждать, что с 1946 г. благодаря энергии наблюдателей небо южного полушария изучено лучше, чем северного. На равных площадках на южной полусфере известно почти в два раза больше двойных звезд, чем на северной.

Первый каталог Иннеса не имел дополнений. Перепись пар со склонениями южнее -19° была зафиксирована Иннесом и его сотрудниками в *Southern Catalogue looseleaf mimeograph*. Эта картотека постоянно используется и известна под названием SDS (*Southern Double Stars*).

С 1950 г. поиски двойных звезд на южном небе были прекращены.

Двойные звезды, открытые по фотографиям

Большое число двойных было найдено не непосредственно на небе, а на фотографических пластинах, предназначенных для составления *«Carte du Ciel»*. Таким образом, астрономы, не выходя из библиотек, открыли 15 000 пар. Но некоторые из этих двойных оказались ложными, так как за двойные были приняты дефекты пластинок. Фотоснимки *«Carte du Ciel»* не были предназначены для поисков двойных звезд, и на них трудно обнаружить пары с малым угловым разделением. Пары, найденные по фотографиям, относятся к широким и имеют очень медленное орбитальное движение.

Другое дело — пластиинки, полученные в фокусе инструментов с большим фокусным расстоянием со специальными мерами предосторожности (как принимаемые на обсерватории Спрул

около Филадельфии для измерения звездных параллаксов и во Флагстаффе на астрометрическом рефлекторе апертурой 150 см). Число двойных, изученных таким образом и называемых астрометрическими или звездами с невидимым спутником, невелико. Некоторые из них, например Ross 614, состоящие из красных карликов наизнешней светимости, представляют большой интерес.

Двойные звезды с большим общим собственным движением

Уже давно известно, что существует большое число звезд-карликов, среди которых благодаря исследованиям Койпера выявлено некоторое число двойных. Но визуальные наблюдения не позволяют обнаружить большое число таких звезд, поскольку из-за низкого блеска они не видны на расстояниях, превышающих 25 световых лет. С помощью фотографии можно обнаруживать чрезвычайно слабые красные карлики на значительно больших расстояниях, вплоть до 500 световых лет.

Следовательно, невозможно выявить большое число двойных, состоящих из звезд-карликов, иначе как по фотографиям, ограничиваясь наиболее сильно разделенными парами и изучая общее собственное движение компонентов. Лейтен внес большой вклад в изучение слабых двойных звезд на камере Шмидта обсерватории Маунт-Паломар. Он исследовал одну треть неба и открыл в общей сложности 2000 пар со звездными величинами ярче 21,5'', разделением больше 2'' и собственным движением, превышающим 0,2'' в год. Среди этих 2000 звезд-карликов 120 пар содержат белые карлики или вырожденные звезды в качестве спутников, а в 14 парах белый карлик является главным компонентом. Лейтен заключил отсюда, что двойные звезды такого типа, возможно, весьма распространены, но их малозаметное орбитальное движение не дает возможности определить их орбиты.

Великие наблюдатели двойных звезд

Работа основоположников поисков двойных звезд была бы бесполезной без непрерывных наблюдений этих звезд с целью определения их орбит. Конечно, есть такие наблюдатели, которых интересуют лишь их собственные открытия. Но астрономия двойных звезд может гордиться великими наблюдателями, которые посвятили свою жизнь наблюдениям и тщательным измерениям пар, открытых другими наблюдателями. Стоит назвать имена наиболее выдающихся из них.

Нередко наблюдателями двойных звезд были не профессионалы, а увлеченные любители, такие, как Бернхем, деятельность

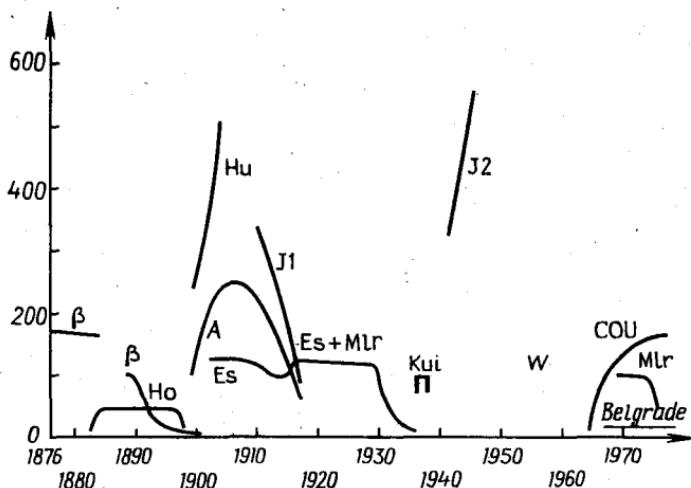


Рис. 1.1. Результаты изучения двойных звезд к северу от склонения -31° за 100 лет. По оси абсцисс отложены годы, по оси ординат — среднее годовое число открытых пар.

A — Эйткен. Рефракторы с диаметром объектива 30 и 91 см Ликской обсерватории; 3100 пар.

β — Бернхем. 1336 пар, открытых с самыми различными инструментами, к которым следует добавить 150 пар с большим общим собственным движением, открытых отдельно.

Belgrade — сотня пар, открытых с 1966 г. на рефракторе с диаметром объектива 66 см Джурковицем, Олевицем и Поповичем в Белграде.

COU — Куто. Ницца, рефракторы с диаметром объектива 38 см (145 пар), 50 см (1400 пар) и 74 см (два десятка пар).

Es — Эспин. Рефлекторы с апертурой 40 и 60 см в Тау-Лоу, Англия, 2700 пар.

Ho — Хок. 622 пары, рефрактор с диаметром объектива 47 см на Дирборнской обсерватории.

Hu — Хасси. Рефракторы с диаметром объектива 30 и 91 см Ликской обсерватории; 1340 пар.

J1 — Жонкер. 1358 пар, из которых 1010 открыты с рефрактором 33 см в Лилле и 252 пары — в Гринвиче на рефракторе 71 см.

J2 — Жонкер. 1942 пары, из которых 495 открыты на рефракторе 26 см в Марселе, 1362 — на рефлекторе 80 см в Марселе и 88 пар — на рефракторе 38 см в Ницце.

Kui — Койпер. Рефрактор с диаметром объектива 91 см Ликской обсерватории; 117 пар.

Mlr — Мюллер. Первые четыре открытия сделаны на рефракторе с диаметром объектива 91 см Ликской обсерватории, остальные (561 пары) — на 50-сантиметровом рефракторе в Ницце.

W — Уорли. 30 пар, состоящих из красных карликов. Открыты на 91-сантиметровом рефракторе Ликской обсерватории.

которого по увеличению точности и эффективности работы имела определяющий характер. Среди наблюдателей XIX в. можно выделить двух европейцев: это Дос (1835) в Англии, прозван-

ный «Орлиный глаз», и барон Эрколь Дембовски (1850) в Италии. Оба эти астронома на маленьких телескопах с апертурой, не превосходящей 15 см, измерили все доступные их инструментам двойные с точностью, которая остается очень высокой и теперь, спустя целый век.

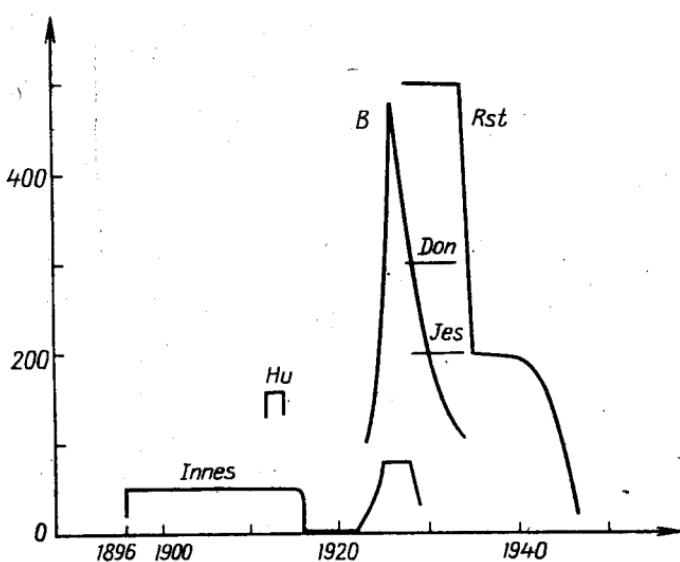


Рис. 1.2. Результаты полувекового исследования двойных звезд на Южной полусфере. По оси абсцисс отложены годы, по оси ординат — среднее годовое число открытых пар.

B — ван ден Бос. 2800 пар, открытых в Иоганнесбурге на рефракторе с диаметром объектива 69 см.

Hu — Хасси. 300 пар, открытых с 43-сантиметровым рефрактором на обсерватории Ла-Плата.

Innes — Иннес. 450 пар, открытых с 1896 по 1903 г. на 45-сантиметровом рефракторе Капской обсерватории, затем 1200 пар, открытых на большом рефракторе в Иоганнесбурге.

Rst, Don, Jes — Росситер, Доннер, Жессуп. 7368 пар, из которых 5534 открыты Росситером.

В Америке ван Бисбрук (1880—1974), бельгиец по национальности, на протяжении трех четвертей века, с 1901 по 1974 г. наблюдал самые трудные пары. В 1915 г. он получил в свое распоряжение самый мощный в мире рефрактор Йерской обсерватории (диаметр объектива 101 см), который он использовал в 1939 г. совместно с 2-метровым рефлектором обсерватории Мак-Дональда, а с 1964 г. он работал на новом рефлекторе с зер-

калом диаметром 2,1 м обсерватории Китт-Пик (Нью-Мексико). Большое число орбит двойных звезд опирается на измерения этого астронома: он провел около 35 000 наблюдений 10 000 пар. В настоящее время Уорли в Вашингтоне и Хайнц на обсерватории Спрул продолжают американские традиции.

Франция всегда первенствовала в астрономии двойных звезд. Фламмарион (1842—1925) опубликовал в 1878 г. *Catalogue des étoiles doubles et multiples en mouvement relatif certain*, труд, прекрасно изданный, тщательно излагающий детали и охватывающий большой объем наблюдений. Во Франции всегда были наблюдатели двойных звезд. Перротэн в 1880-х годах на 38-сантиметровом рефракторе в Ницце и Жакобини после первой мировой войны на телескопе 30 см в Париже внесли большой вклад в изучение двойных звезд. Бэз, врач по профессии, но увлеченный любитель астрономии, непрерывно наблюдал двойные с 1924 г. Он имел в своем распоряжении рефракторы 30 см, затем 38 см в Париже, на которых с 1930 по 1972 г. он выполнил около 25 000 измерений. Он — единственный француз, который наблюдал двойные в течение всей второй мировой войны. Наука обязана ему, кроме того, определением более 130 орбит, а также каталогом двойных красных карликов. Дюрюи, горный инженер, другой страстный любитель астрономии, выполнил с 1937 г. тысячи наблюдений двойных звезд на своих частных обсерваториях в Нанси (рефрактор с диаметром объектива 27 см) в Рурé в Приморских Альпах (рефлекторы с зеркалами 40 и 60 см).

Французские астрономы всегда вносили большой вклад в совершенствование микрометров, используемых для измерения двойных звезд. Данжон (1937) изобрел микрометр с пластинкой в полволны, Мюллер (1937) изобрел микрометр двойного изображения, Дюрюи (1935) — микрометр со звездой сравнения.

Среди немецких астрономов следует отметить Рабе, который с 1915 по 1956 г. с рефрактором 27 см в Мюнхене выполнил 30 000 измерений двойных звезд, среди бельгийцев — Аренда и Домманже (рефрактор 45 см).

В южном полушарии Баут, по происхождению голландец, с 1940 по 1944 г. наблюдал несколько тысяч пар на о. Ява в обсерватории Лембанг с рефракторами 37 и 60 см.

В последнее время ряды выдающихся наблюдателей двойных звезд поредели. В 1974 г. с интервалом в несколько месяцев умерли ван Бисбрук, ван ден Бос, Жонкер. Нехватка специалистов усугубляется в уже поредевших рядах наблюдателей, которых в настоящее время можно буквально пересчитать по пальцам. Уход в отставку многих других наблюдателей, таких, как Бэз, Финзен, вынуждают позаботиться о скорейшей подготовке новых высококвалифицированных наблюдателей двойных звезд. Но можно надеяться, что среди 3,5 миллиарда человек, живущих

ших на земном шаре, найдутся преданные и увлеченные наблюдатели двойных звезд, как они всегда находились, и что факел, который до сих пор несли так высоко, не угаснет.

Централизация измерений

Наблюдения двойных звезд, выполненные в южном полушарии, никогда не были собраны в издание, аналогичное каталогу 1932 г. Этот каталог, впрочем, быстро устарел в смысле полноты измерений и наличия новых пар. Современное издание мировых данных по двойным звездам было бы весьма дорогостоящим, а приведенные в нем данные быстро устарели бы, поэтому оказалось предпочтительнее публиковать лишь приложение к каталогу.

Каждая известная двойная вместе с ее измерениями заносится на перфокарту. Эта огромная работа была выполнена на Ликской обсерватории в 1963 г. Джейферсоном, ван ден Босом и Гриби. Все пары, занесенные на перфокарты, были собраны в *Index Catalogue of Visual Double Stars 1961, 0.*

Он издан в двух томах и насчитывает 64 247 двойных звезд. Для каждой пары даны положения для эпох 1900 и 2000 г., даты первого и последнего измерений, число измерений, сделанных в различные эпохи (если это число превосходит 25, то символ 99 означает, что измерения многочисленны), позиционные углы и расстояния, соответствующие эпохам первого и последнего измерений, звездные величины компонентов, редуцированные к шкале каталога HD, спектральные классы, собственное движение главного компонента, номер по каталогу Аргеландера (BD) или Кордбоскому обозрению (CD) для южных звезд, номер по каталогу Эйткена и ссылка на пояснительные замечания (если они есть). Этот *Index* будет переиздаваться раз в 10 лет. Он служит в настоящее время для отождествления всех опубликованных пар, даже тех, существование которых весьма сомнительно.

Перфокарты измерений двойных звезд, насчитывающие около 300 000 штук, в настоящее время собраны в Вашингтоне, где находится центральная картотека. Копии ее есть в Херстмонсе и в Ницце; они выходят в свет много раз в год; их издание осуществляется центральной картотекой, возглавляет которую Уорли. Информация, собранная на этих картах и в *Index*, также записана на магнитную ленту. Любой из этих центров может выслать каждому желающему требуемые измерения, поэтому отпадает необходимость периодической публикации измерений двойных звезд в виде больших сборников.

Общие характеристики ансамбля известных двойных звезд

70 000 пар — это то, что удалось выявить с помощью наших наблюдательных средств, однако они не представляют достаточно полно население двойных среди всех звезд. Доля двойных звезд в трех диапазонах звездных величин такова:

Звездная величина	$< 8^m$	от 8 до 11^m	$> 11^m$
Доля пар, %	8	65	27

Итак, блеск трех четвертей известных двойных превышает 11^m , следовательно, они имеют относительно высокую светимость. Отсюда приблизительно на 15 звезд приходится одна двойная. Реальное соотношение числа двойных и одиночных звезд больше, поскольку в окрестностях Солнца приблизительно каждая вторая звезда двойная. Это свидетельствует о том, что чем больше расстояние, тем меньше двойных звезд регистрируется.

Существует эффект наблюдательной селекции, вполне понятный, если заметить, что треть известных пар состоит из приблизительно одинаковых звезд, это не соответствует действительности, поскольку в окрестностях Солнца имеются пары с сильно различающимися компонентами, такие, как Сириус, Процион, η Кассиопеи, ζ Геркулеса, 85 Пегаса. Если бы они находились на расстояниях, в 10 раз больших, то, за исключением, быть может, η Кассиопеи, эти системы были бы неразрешимы и наблюдались бы как одиночные звезды.

27 из 100 слабых пар выявляются либо среди звезд, найденных на картах неба, либо с помощью фотографических исследований на обсерватории Маунт-Паломар слабейших карликов, которые совершенно недоступны глазу, поскольку большинство из них лежит на пределе обнаружения фотографического метода, в сто раз более чувствительного, чем глаз.

Едва ли для половины зарегистрированных пар известны собственное движение и спектральный класс. Распределение по спектральным классам дано в следующей таблице:

Спектральный класс	O	B	A	F	G	K	M	Пекулярный спектр
Доля пар, %	Очень мала	8	25	26	22	16	3	Мала

Здесь даны средние, наиболее типичные классы, что соответствует общему распределению звезд по спектральным классам. Распределение показывает, что двойные звезды по физическим свойствам не отличаются от одиночных. Следует отметить, что фотографические исследования способствуют выявлению красных карликов класса M.

Поучительно рассмотреть распределение двойных звезд по их угловому разделению. Следующая сводная таблица дает число известных пар на северном и южном небе для разных угловых разделений компонентов.

Угловое разделение	Число известных пар	
	северного неба	южного неба
$\leqslant 0,25''$	569	884
$< 0,5$	1929	3266
$< 1,0$	3457	6090
$< 2,0$	6192	10 143
$< 5,0$	14 856	18 338
Все $> 5''$	39 883	29 976

Эта таблица была подготовлена в 1975 г. по данным центральной картотеки в Вашингтоне, записанной на магнитных лентах. Почти половина из 569 тесных двойных северного неба была открыта Мюллером и автором на протяжении 10 лет. Несмотря на это, число тесных пар на северной полусфере меньше, чем на южной. (Половина южных звезд была открыта Росситером в Блумфонтейне.)

Звездные пары с угловым разделением, превышающим 5'', считаются очень широкими, поскольку на средних расстояниях до двойных звезд от 300 до 400 световых лет оно соответствует расстоянию между компонентами, превышающему 500 а. е. В таких системах орбитальное движение компонентов слишком медленное, чтобы его можно было обнаружить, а период обращения составляет тысячи лет. Таблица показывает, что более половины известных пар принадлежит к этой категории, которая более многочисленна на северной полусфере благодаря исследованиям Лейтена на обсерватории Маунт-Паломар.

КРАТКАЯ БИБЛИОГРАФИЯ

1. Aitken R. G. *The Binary Stars*. Dover Publ. Inc., New York, 1935.
2. Baize P. L'Astronomie des étoiles doubles. Bull. S. A. F., p. 269, 1930.
3. Baize P. Catalogue de 240 couples visuels d'étoiles naines rouges, J. des Obs., 49, No. 1, 1966.
4. Van den Bos W. H. Surveys and observations of visual double stars. Basic Astron. Data, The Univ. of Chicago Press, 1963, p. 320.
5. Burnham S. W., Measures of proper motions stars made with the 40" refractor of the Yerkes Observatory in the years 1907—1912, Carnegie Inst. of Washington, 1913.
6. Crossley E., Gledhill J., Wilson J. M. *Handbook of double stars*, Macmillan and Co., 1879.

7. *Flammarion C.* Catalogue des étoiles doubles et multiples en mouvement relatif certain, Gauthier-Villars, 1878.
8. *Heintz W. D.* Doppelsterne, W. Goldmann Verlag, Munchen, 1971.
9. *Innes R. T. A.* Reference Catalogue of southern double stars, Ann. Roy. obs. Cape of Good Hope, 1899, vol. 2, part. II.
10. *Jonckheere R.* Catalogue and measures of double stars discovered visually from 1905 to 1916 within 105° of the North pole and under $5''$ separation, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., LXI, 1917.
11. *Jonckheere R.* Catalogue général de 3 350 étoiles doubles de faible éclat observées de 1906 à 1962, Obs. Marseille, 1962.
12. *Luyten W. J.* Proper motion survey, Basic Astron. Data, The Univ. of Chicago Press, 1963, p. 46.
13. *Luyten W. J.* Double Stars with common proper motion, Univ. Minnesota, No. 29, 10, 1972.
14. The Webb Society Observers Handbook, Vol. I, Double Stars, The Mizar Press, London, 1975.
15. *Vyssotsky A. N.* Astrophys. J., 97, 381, 1943; Astrophys. J., 104, 191, 1946; Astrophys. J., 116, 21, 1952; Astron. J., 61, 37, 1956; Astron. J., 63, 77, 1958.

Глава 2

ПОНЯТИЯ ИЗ ОПТИКИ, НЕОБХОДИМЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЮ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Основной инструмент. Телескоп-рефрактор

Измерения двойных звезд — это, как правило, наблюдения при высоком угловом разрешении. Для них требуются инструменты, дающие близкие к теоретическим дифракционные изображения, которые можно рассматривать с достаточно высоким увеличением.

Вот уже полтора века известно, как сделать объектив, дающий хорошее изображение на оптической оси. Разрешение больших рефракторов конца прошлого века выдерживает конкуренцию с лучшими современными рефлекторами.

Поэтому наблюдатели двойных звезд по сей день используют главным образом телескопы-рефракторы. Имеются и другие соображения в пользу рефрактора. Рефлекторы обычно снабжены разнообразным оборудованием, которое меняется после кратковременных наблюдений. Это обстоятельство не позволяет выполнять эффективно работы по измерению двойных звезд, поскольку для этой цели наблюдатель должен располагать инструментом в определенный непредсказуемый момент времени, соответствующий хорошему качеству изображения. Он не может проводить наблюдения, если даже небо очень чистое, но качество изображения плохое. С другой стороны, рефракторы имеют меньшую светосилу, чем рефлекторы, более избирательны, хуже приспособлены к установке вспомогательных приборов и не используются для спектроскопических и электрофотометрических работ. Они сильнее загружены астрометрическими работами, для которых измерение двойных звезд является важной частью их программы.

Многие понятия, сформулированные ниже, детально изложены в книге Данжона и Кудэ [2] «Телескопы». Мы подробно остановимся только на тех понятиях, которые имеют наиболее важное значение для наблюдателей двойных звезд.

Увеличение. Выходной зрачок

Изображение объекта строится объективом на части поверхности, называемой фокальной плоскостью. Резкость изображения зависит от диаметра объектива. Изображение рассматривается в лупу, состоящую из нескольких линз и называемую окуляром, который, как и объектив, можно схематически изобразить в виде тонкой линзы (рис. 2.1). Оптическая система является

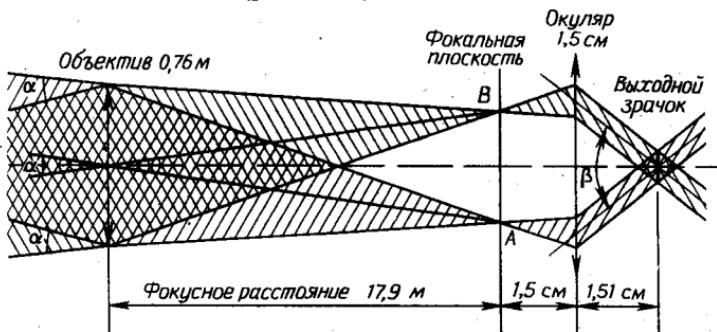


Рис. 2.1. Телескоп-рефрактор. Схема построения изображения. Увеличение. Объектив строит изображение AB компонентов двойной звезды в фокальной плоскости. В окуляр изображение AB видно под углом β , большим, чем угол α . Для наглядности схема дана в произвольном масштабе. Приведены реальные размеры большого рефрактора в Ницце. Для двойной звезды Кастор $\alpha = 2,20''$, $\beta = 44'$, $AB = 0,192$ мм, увеличение $\beta/\alpha = 1200$. Диаметр выходного зрачка 0,63 мм.

афокальной, поскольку пучок света выходит из окуляра в виде параллельных лучей. Изображение объекта, видимого в объектив под углом α , строится с помощью системы «объектив—окуляр» на бесконечности и видно в окуляр под углом β . Отношение углов β и α , или отношение фокусных расстояний F и f объектива и окуляра, называется **увеличением**:

$$G = F/f. \quad (2.1)$$

Близорукие и дальнозоркие люди, глаз которых не аккомодируется на бесконечность, не могут наблюдать со строго афокальным инструментом, но при этом угол расходимости или сходимости пучка соответственно, как правило, невелик. Отметим только, что близорукие оказываются в выигрыше: в данный инструмент они видят объекты с большим увеличением, чем дальнозоркие. Впрочем, и близорукие, и дальнозоркие могут наблюдать в афокальный инструмент без напряжения, поскольку выходящий пучок очень узкий и имеет диаметр много меньше, чем диаметр зрачка глаза. В результате зрачок работает с большим относительным фокусным расстоянием, что уменьшает эффекты, свя-

занные с геометрическими дефектами хрусталика. Поэтому экскурсанты, посещающие обсерваторию, при наблюдении звезд, как правило, не нуждаются в изменении фокусировки телескопа и даже могут наблюдать без очков.

Изображение объектива, создаваемое окуляром, называется выходным (или окулярным) зрачком. Он лежит практически в фокальной плоскости окуляра. Свет, собранный объективом, попадает затем в выходной зрачок. Именно сюда следует поместить глаз, чтобы в него попал весь свет, собранный объективом и перехваченный окуляром. Начинающий наблюдатель обычно помещает глаз позади выходного зрачка, неминуемо диафрагмируя при этом полезный пучок света радужной оболочкой глаза и наблюдая лишь часть фактического поля зрения.

Отношение диаметров объектива и выходного зрачка равно увеличению:

$$G = D/d = f/f. \quad (2.1')$$

Освещенность выходного зрачка пропорциональна G^2 .

Согласно уравнению (2.1'), существует минимальное допустимое при данном объективе увеличение, так как при меньшем увеличении выходной зрачок больше, чем зрачок глаза при его максимальном раскрытии; такое увеличение называется *равнозрачковым*. Поскольку диаметр зрачка человеческого глаза достигает вочных условиях 0,6 см (у отдельных людей до 0,8 см), равнозрачковое увеличение определяется выражением

$$G_e = D/0,6.$$

Такое увеличение имел бы глаз великана со зрачком диаметра D .

Поскольку относительное фокусное расстояние $m = F/D$, получаем фокусное расстояние окуляра, соответствующего равнозрачковому увеличению,

$$f = 0,6m,$$

что соответствует десяткам сантиметров для инструментов, используемых для визуальных наблюдений.

Чтобы видеть изображение в фокальной плоскости без окуляра, нужно расположить глаз на расстоянии от нее $\Delta = 0,6 m$, на котором пучок света полностью перехватывается зрачком глаза. Поскольку Δ не может быть меньше минимального расстояния ясного зрения, которое составляет около 25 см для нормального глаза, это условие требует относительного фокусного расстояния объектива телескопа больше 40. Следовательно, никакой современный телескоп не позволяет наблюдать без окуляра без значительных потерь света, но такие наблюдения были возможны с длиннофокусными рефракторами XVII в., относительное отверстие которых достигало 290. Телескопы времен Мольера

имели такую колоссальную длину, чтобы уменьшить до приемлемых пределов хроматическую aberrацию однолинзовых объективов, которыми они были снабжены.

Изображение, даваемое круглым объективом.

Разрешающая способность.

Разрешающее увеличение.

Полезное увеличение

В случае точечного источника света интенсивность на расстоянии n от центра геометрического изображения, создаваемая круглым объективом, выражается следующей формулой:

$$I = A^2 [2J_1(n)/n]^2 = A^2 \varphi^2(n), \quad (2.2)$$

где A — константа, зависящая от блеска звезды и инструмента, $J_1(n)$ — функция Бесселя первого порядка. Перейдем от расстояния n к величине d , выраженной в микрометрах:

$$d = 0,321\lambda mn, \quad (2.3)$$

где λ — длина волны. Такое распределение интенсивности называется дифракционной картиной или фигурой Эри. Дифракционное изображение состоит из центрального максимума (так называемого дифракционного диска), окруженного последовательно чередующимися темными и светлыми дифракционными кольцами. Линейный радиус первого темного кольца дается выражением

$$r = 1,22\lambda F/D = 1,22\lambda m, \quad (2.4)$$

тогда как в угловой мере этот радиус выражается в радианах следующим образом:

$$a = r/F = 1,22\lambda/D. \quad (2.4')$$

Эффективная длина волны в визуальной области спектра равна приблизительно 0,55 мкм, откуда $r = 0,67 m$ в микрометрах и $a = 14/D$ в секундах дуги, где D выражено в сантиметрах.

Сделаем несколько существенных замечаний. Величины r и a являются эквивалентными параметрами, определяющими размер первого темного дифракционного кольца, но r — это линейная величина, а a — величина угловая. Первая из них не зависит от апертуры, а зависит только от относительного отверстия, вторая же величина зависит от диаметра входного отверстия объектива.

Линейный радиус дифракционного кружка для астрометрических рефракторов, хроматическая aberrация которых исправлена для желтых лучей, близок к 10 мкм. В первичных фокусах больших рефлекторов, у которых относительное фокусное рас-

стояние близко к 3, этот радиус меняется от 2,5 мкм для красной области спектра до 1,5 мкм для синей области. Изображения у рефракторов чище — красная и синяя области спектра дают далекий, мало мешающий визуальным наблюдениям ореол (так называемый вторичный спектр). Схема Кассегрена увеличивает относительное фокусное расстояние системы, а следовательно, и линейные размеры дифракционной картины, но ни в коей мере не уничтожает различие диаметров дифракционных колец разного цвета; кроме того, фокусное расстояние таких рефлекторов нестабильно.

Эти соображения важны для наблюдений двойных звезд. В хороший рефрактор в течение ночи с высоким качеством изображения звезды дают четкие, близкие к теоретическим дифракционные картины с густым фиолетовым ореолом вокруг наиболее ярких объектов. Но кольца всегда хорошо очерчены и не окрашены.

Рассмотрим теперь фундаментальные различия глаза и фотографии. Фотография регистрирует линейные размеры изображения, а глаз — угловые. При фотографировании двойных звезд мы заинтересованы не только в большом относительном фокусном расстоянии, чтобы получить дифракционное изображение как можно больших линейных размеров, но также и в большой апертуре, чтобы эта картина имела малые угловые размеры. Визуальные же наблюдения требуют только большой апертуры, если используется достаточно мощный окуляр. Иными словами, при визуальных наблюдениях можно хорошо видеть дифракционную картину, что трудно осуществить при фотографических наблюдениях из-за малых размеров дифракционного изображения. Это большое преимущество визуальных наблюдений перед фотографическими.

Поэтому, несмотря на все достижения техники, трудно получить хорошие фотографии компонентов ζ Рака или ω Льва, которые тем не менее легко разрешить при визуальных наблюдениях. Более того, только в 1971 г. удалось увидеть спутник θ Северной Короны, звездная величина которого $7''$ и который находится на расстоянии $0,5''$ от главной звезды. Достаточно посмотреть на эту звезду в хороший рефрактор с диаметром объектива 30 см, чтобы увидеть спутник, который не удавалось сфотографировать с большими телескопами. К сожалению, в наше время небо не наблюдают визуально, а фотографируют, при этом неизбежно теряется часть информации, которую фотография не может донести до наблюдателя. Не удивительно ли, что мы имеем возможность регистрировать звезды 23-й звездной величины, затерянные в глубинах Галактики, и не в состоянии сфотографировать звезду 7-й звездной величины, расположенную на расстоянии всего лишь $0,5''$ от звезды 4-й звездной величины?

Разрешающая способность, или разрешение, составляет по определению $\frac{86}{100}$ углового размера первого темного дифракционного кольца, т. е. в секундах дуги:

$$p = 0,85a = 12/D. \quad (2.5)$$

Таким образом, объектив диаметром 10 см имеет разрешающую способность $1,2''$, что соответствует двум дифракционным пятнам, не полностью разрешенным, но различимым в виде сжатой восьмерки. Разрешающая способность является произвольным понятием, которое не связано с каким-либо естественным пределом.

Разрешающее увеличение — это увеличение, которое позволяет видеть радиус первого дифракционного кольца на пределе разрешения глаза, равном $1'$. В этом случае имеем

$$pG_r = 60'', \quad G_r = R \text{ мм.} \quad (2.6)$$

Это означает, что разрешающее увеличение численно равно радиусу объектива, выраженному в миллиметрах, или утроенному равнозрачковому увеличению.

Разрешающее увеличение позволяет различить дифракционное изображение на пределе разрешения глаза. Если мы хотим видеть структуру дифракционного изображения, например, при наблюдениях тесных пар, разумно использовать большее увеличение, называемое *полезным увеличением*, которое может в 5 раз превосходить разрешающее увеличение. Обычно используется полезное увеличение, равное трех- или четырехкратному разрешающему увеличению. При больших увеличениях контуры изображения становятся нечеткими и глаз не в состоянии выделить детали. Измерения двойных звезд не следует производить с увеличениями, меньшими удвоенного разрешающего увеличения.

Напомнив эти основные понятия, рассмотрим теперь структуру изображения тесной визуально-двойной звезды.

Структура изображения тесной двойной

Тесной двойной называется пара, расстояние между компонентами которой меньше или равно радиусу первого темного дифракционного кольца.

Компоненты пары полностью разделены, когда расстояние между ними больше диаметра первого темного кольца. Зрительное восприятие не вполне соответствует этому определению, поскольку интервал между изображениями казался бы черным, даже если бы расстояние между ними было несколько меньше этого диаметра. При каком разделении такое восприятие нару-

шается? Можно ли описать его математически с помощью теории дифракции?

Мы подробно рассмотрим эти вопросы, поскольку различные мнения относительно предела разрешения инструментов не всегда совпадают. Данжон и Күдэ определили в своей книге [2] предел разрешения с помощью опорных кривых — изофот и привели для него численное значение $85/100$ радиуса ложного диска. Но визуальные наблюдатели сравнительно легко измеряют еще более тесные двойные, следовательно, предел разрешения может быть уменьшен. Где же остановиться? Иногда задается такой

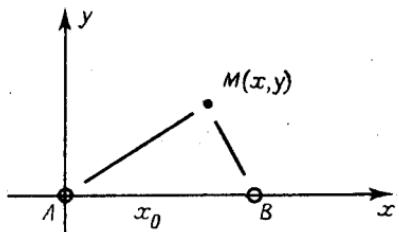


Рис. 2.2. Освещенность, создаваемая объективом в точке фокальной плоскости. Оба компонента A и B дают вклад в освещенность в точке M .

вопрос, и ответы на него различны. Проанализируем явление «исчезающей двойственности» и свяжем его с визуальным восприятием.

Рассмотрим фокальную плоскость, в которой лежат две взаимно перпендикулярные оси x , y (рис. 2.2). Компонент A поместим в начале координат, а компонент B — на оси x на расстоянии x_0 от компонента A .

Вспомним уравнение (2.2), которое описывает структуру дифракционного изображения точечного источника. В случае двойной звезды, когда компоненты не разрешаются, интенсивности складываются, так что интенсивность в точке $M(x, y)$ в фокальной плоскости имеет вид

$$I(x, y) = A^2 \Phi^2 \{(x^2 + y^2)^{1/2}\} + B^2 \Phi^2 \{[(x - x_0)^2 + y^2]^{1/2}\}. \quad (2.7)$$

Что касается уравнений изофот, то они записываются следующим образом:

$$C^{te} = I(x, y). \quad (2.8)$$

Детальное изучение кривых, определяемых уравнением изофот, позволяет количественно описать визуальное восприятие при наблюдении двойной звезды, расстояние между компонентами которой меньше, чем предел разрешения.

Отметим еще раз, что распределение интенсивности излучения внутри дифракционного изображения имеет очень четко выделенный пик в центре (рис. 2.3), т. е. максимум интенсивности. Для очень тесной пары характерен двойной максимум или

вытянутая фигура в окрестности максимумов, что и позволяет судить о двойственности звезды. В табл. 1 мы приводим результаты вычислений и интерпретации для теоретической тесной двойной с одинаковыми компонентами. Они выполнены с использованием изофот, полученных Центром изучения астрономических фотографий (С.Д.С.А.) на обсерватории в Ницце. Полезно прокомментировать эту весьма информативную таблицу. При разделении компонентов в один радиус дифракционного кружка относительная интенсивность середины двойного изображения составляет 0,75. Этого достаточно, чтобы обеспечить иллюзию

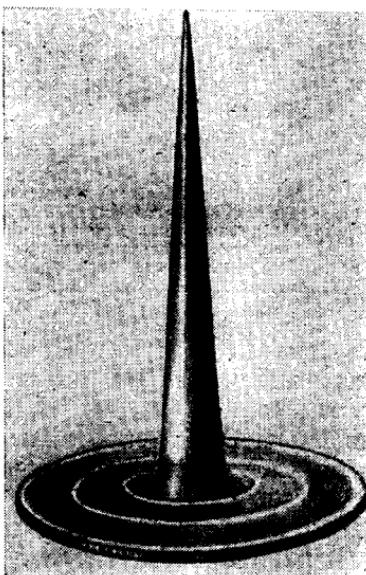


Рис. 2.3. Геометрическое представление явления дифракции. Высоты пропорциональны интенсивности. Обратите внимание на интенсивность центрального пика.

полного оптического разделения, т. е. узкого темного интервала между компонентами. Такой эффект особенно четко проявляется для двойных, не очень ярких, дифракционные кольца которых едва видны. При меньших разделениях, до 0,8 радиуса дифракционного диска, еще различаются два максимума интенсивности. Важно отметить, что они не совпадают с геометрическим изображением компонентов и расстояние между ними меньше. Это различиеничтожно для разделении в один радиус дифракционного диска и быстро увеличивается с уменьшением расстояния между компонентами, как это показано в табл. 1. Таким образом, для расстояния между компонентами 0,85 радиуса дифракционного диска, еще соответствующего возможному разрешению, максимумы интенсивности находятся на расстоянии 0,64 радиуса дифракционного кружка один от другого и разделены

промежутком пониженной интенсивности, значение которой составляет 0,96 от интенсивности в максимумах, еще различимым глазом в случае достаточно ярких компонентов.

Таблица 1

:	2	3	4	5	6	7	8
1	1	0,748		0,280"	0,280"		Разделение
0,95	0,91	0,827	1,47	0,266	0,255		Касание
0,90	0,80	0,902	1,45	2,08	0,252	0,224	Восьмерка
0,85	0,64	0,961	1,425	2,00	0,238	0,179	Сплюснутая восьмерка
0,80	0,35	0,995	1,40	1,90	0,224	0,098	Сжатый овал
0,75	0	1	1,38	1,77	0,210	0	Овал
0,70			1,35	1,64	0,196		Овал
0,60			1,30	1,42	0,168		«Маслина»
0,50			1,25	1,26	0,140		Слегка овальное

1. Расстояние между компонентами в долях радиуса дифракционного кружка.
2. Расстояние между максимумами интенсивности.
3. Относительная интенсивность между максимумами изображения.
4. Вытянутость, определяемая как отношение большой и малой осей изображения.
5. Вытянутость изофоты по уровню 0,5 интенсивности.
6. Разделение звезд, соответствующее 50-сантиметровому рефрактору в Ницце.
7. Разделение максимумов для 50-сантиметрового рефрактора в Ницце.
8. Вид изображения при достаточно большом увеличении.

Отсюда следует, что нитяные микрометры, принцип работы которых основан на наведении тонких нитей на максимум интенсивности, не позволяют точно измерять неразрешенные двойные. Это справедливо и для микрометров двойного изображения. Опыт показывает, что лучший микрометр в этом случае — само дифракционное изображение. Наблюдатель, привыкший к своему объективу, имея в своем активе годы практики и тысячи измерений, не может сильно ошибиться, оценивая разделение компонентов по виду изображения. Но ему следует подвергнуть такие измерения последующей обработке, чтобы исключить систематические ошибки. Разумеется, мы не рекомендуем нович-

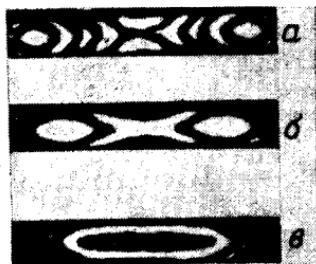


Рис. 2.4. Теоретические изофоты центра дифракционного изображения неразрешенной двойной звезды, состоящей из одинаковых компонентов. (Фото С.Д.С.А.) Видно значительное изменение теоретической структуры изображения при переходе от разделения компонентов 0,9 г к 0,8 г. а — разделение 0,9 г (0,504" для отверстия 25 см), максимумы интенсивности хорошо различаются; б — разделение 0,85 г (0,476" для отверстия 25 см), максимумы интенсивности отчетливо видны. в — разделение 0,79 г (0,442" для отверстия 25 см), видна только сильно вытянутая фигура в центре.

кам начинать работу с наблюдений тесных пар, но следует признать, что двойные звезды, динамически наиболее интересные, а также еще не открытые, являются в большинстве своем тесными парами, компоненты которых неразрешимы даже в большие инструменты. Наши знания о массах звезд сильно зависят от точности определения углового разделения звезд, изображения которых накладываются.

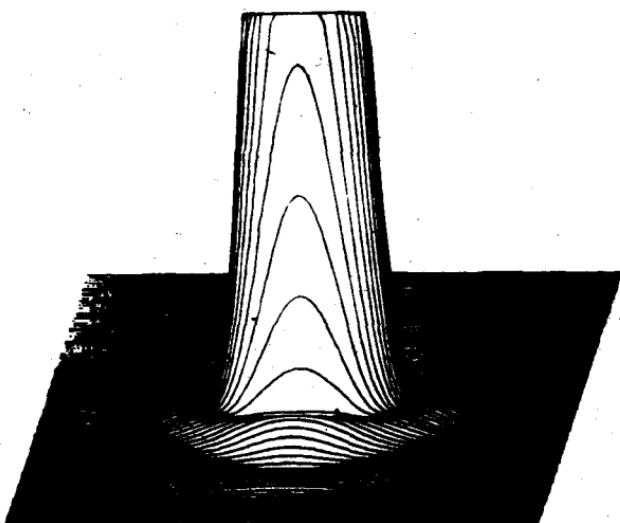


Рис. 2.5. Изофоты неразрешенной двойной звезды, блеск компонентов которой одинаков. (Фотография С.Д.С.А.) Можно заметить две симметричные пучности света в первом кольце.

Рис. 2.4 воспроизводит изофоты центра дифракционного пятна для трех теоретических пар с разделением компонентов 0,9 радиуса дифракционного диска, несколько превышающим предел разрешения, равным пределу разрешения и несколько меньшим, чем предел разрешения (0,79 радиуса дифракционного диска). Отметим, что в случаях, показанных на рис. 2.4, *a* и 2.4, *b*, максимумы интенсивности легко различаются, а в случае, показанном на рис. 2.4, *в*, центральная область изображения сильно вытянута. Двойственность объекта лучше выявляется по виду центра изображения, чем по его общему виду. Наблюдатель сразу же замечает сложную дифракционную картину центральной части изображения очень тесной двойной звезды даже раньше, чем он замечает вытянутость всего изображения. Начиная с расстояния между компонентами 0,79 радиуса дифракционного диска, изображение имеет только один максимум.

мум, и при этом все оно вытянуто. Эта вытянутость может быть определена как отношение большой и малой осей нулевой изофоты. Вытянутость всего изображения, определенная подобным образом, не обязательно будет бросаться в глаза, так как вблизи нулевой изофоты интенсивность меняется мало. Самое быстрое изменение происходит на изофоте половинного уровня. Опыт показывает нам, что именно форма этой изофоты лучше всего

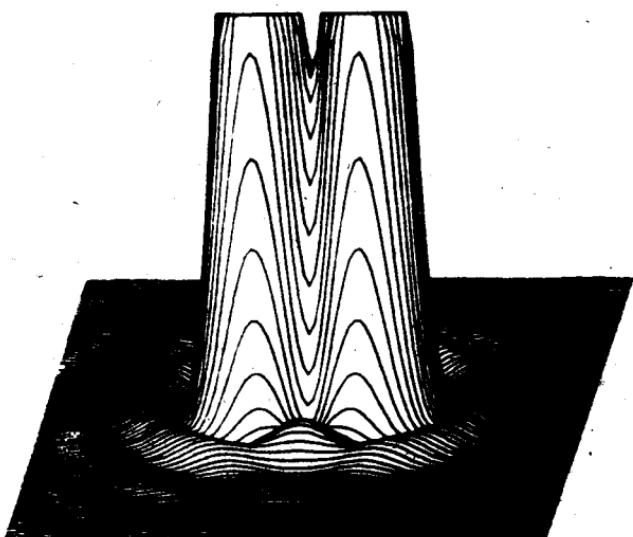


Рис. 2.6. Изофоты двойной звезды с одинаковыми компонентами и с разделением, равным пределу разрешения телескопа. (Фотография С.Д.С.А.) Пучности в первом и втором дифракционных кольцах сильно выражены. Контраст света между серединой изображения и максимумами интенсивности хорошо заметен.

воспроизводит вытянутость изображения в случае визуальных наблюдений. Она дана в пятой колонке табл. 1. Видно, что такая вытянутость всегда больше вытянутости полного изображения и равна 1,42 при разделении компонентов 0,6 радиуса дифракционного диска. Такая же вытянутость полного изображения достигается при разделении компонентов, равном пределу разрешения.

Это позволяет понять, почему наблюдатели распознают и ухитряются измерять пары с разделением, меньшим предела разрешения. Изофоты имеют одинаковую вытянутость при разделении компонентов 0,5 радиуса дифракционного диска, что и определяет предел обнаружения двойственности. Этот предел равен половине радиуса первого темного кольца.

В 6-м и 7-м столбцах табл. 1 даны угловые разделения звезд и максимумов интенсивности для рефрактора с апертурой 50 см в Ницце. В 8-м столбце приведено описание вида изображения, характерного для звезд 6—9,5^м при достаточных увеличениях, достигающих четырехкратного разрешающего увеличения, основанное на опыте наблюдений очень тесных визуально-двойных звезд в течение многих десятилетий.

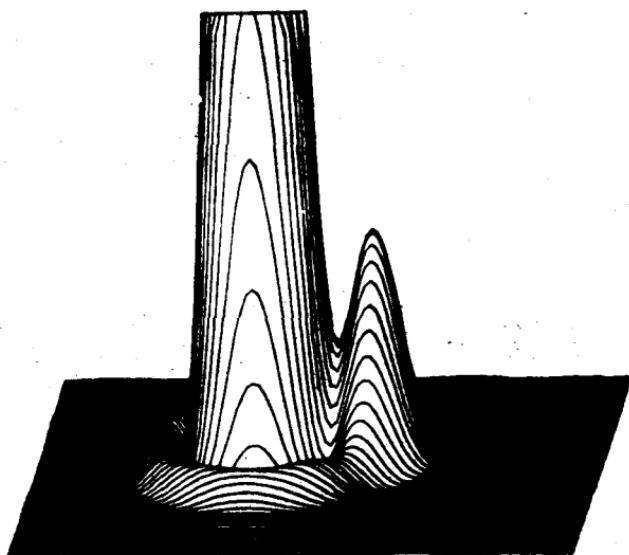


Рис. 2.7. Изофоты двойной звезды с неодинаковыми компонентами. (Фотография С.Д.С.А.)

Прежде чем закончить этот раздел, отметим трудности, связанные с наблюдениями очень тесных двойных. Дрожание и размывание изображения, обусловленные атмосферной турбулентностью, так искажают дифракционную картину, что ее изучение и интерпретация часто становятся невозможными и всегда представляются весьма трудными с инструментами, апертура которых превосходит 30 см. Случайный наблюдатель увидит только «кипящее» пятно там, где опытный глаз различит изображение, характерное для двойной звезды. Поэтому мы рекомендуем любителям тренироваться со скромными инструментами. Телескоп с апертурой 10 см очень хорошо подходит для этой цели, изображения здесь стабильны, интерпретация светящегося пятна значительно легче. Известно несколько пар, характеристики которых соответствуют расчетным данным, приведенным в табл. 1. На-

блюдение таких пар, как ζ Волопаса с угловым разделением $1,13''$, ζ Рака с разделением $0,9''$, ξ Скорпиона с разделением $1,24''$ и многих других, представляет любителю средство для проверки качества своего инструмента и своих способностей к такого рода наблюдениям. Хорошо натренировавшись со скромным инструментом, любитель, который чувствует себя способным к работе на мощном инструменте, сможет успешно анализировать сложные и капризные изображения двойных с помощью крупнейших оптических телескопов и собирать таким образом ценную информацию для вычислителей орбит и звездных масс.

В заключение этой главы рассмотрим светосилу инструмента, параметр, также характеризующий возможности наблюдений, но значение которого существенно меньше для наблюдений двойных звезд, чем для наблюдений планет и вообще протяженных объектов.

Светосила

Светосила — это выигрыш в свете, даваемый инструментом по сравнению с невооруженным глазом. При этом нужно рассматривать отдельно точечные (звезды) и протяженные источники.

1. В случае звезд светосила равна отношению светового потока, собранного инструментом, к потоку, который падает на зрачок невооруженного глаза. Если D и δ диаметры объектива инструмента и зрачка соответственно, то

$$C = (D/\delta)^2 = G_e^2. \quad (2.9)$$

Для звезд светосила всегда больше единицы и равна квадрату равнозрачкового увеличения. Таким образом, в телескоп с диаметром объектива 1 м можно видеть звезды, в 27 800 раз более слабые, чем невооруженным глазом. Предельная визуальная звездная величина дается формулой [2]

$$M = 7,1 + 5 \lg D.$$

Светосила не зависит от увеличения, пока оно заключено между G_e и $15 G_e$; для больших увеличений изображение звезды нельзя считать точечным.

2. В случае протяженных источников следует рассмотреть по отдельности визуальные и фотографические наблюдения.

При визуальных наблюдениях свет, собранный инструментом, распределяется по изображению, увеличенному в G раз, и светосила запишется в виде

$$\Gamma = C/G^2 = (G_e/G)^2. \quad (2.10)$$

Следовательно, она меньше единицы в противоположность светосиле для звезд. Светосила равна единице, если наблюдения вы-

полняются с равнозрачковым увеличением. Таким образом, объекты заметной протяженности при наблюдении в телескоп имеют меньшую или в лучшем случае такую же яркость, как при наблюдении невооруженным глазом.

Эти соображения важны при наблюдениях фона неба, комет или туманностей. Поэтому при наблюдении в телескоп фон неба всегда кажется более темным, чем невооруженному глазу, и тем чернее, чем больше увеличение. Комета или туманность лучше всего видна в телескоп при равнозрачковом увеличении. Но при этом невозможно увидеть все детали изображения, которые способен показать объектив. Если мы хотим исследовать ядро кометы и повысим увеличение, то кома и хвост не будут видны. В случае туманностей, где детали мало контрастны, визуальные наблюдения малоэффективны.

Для наземных наблюдений лучше всего подходит равнозрачковое увеличение или увеличение, немного превышающее равнозрачковое, в противном случае яркость изображения падает. Очертания предметов ночью лучше всего наблюдать с таким увеличением. В этом случае контрастность не изменится по сравнению с невооруженным глазом, но благодаря увеличению изображения мы увидим больше деталей. Начинаяющие часто совершают ошибку, стремясь повысить увеличение своего инструмента, чтобы лучше разглядеть пейзаж.

Наблюдения планет требуют одновременно и хорошего разрешения, и как можно более высокого контраста деталей на диске. Эти два условия противоречат друг другу. Следовательно, вид планетного диска будет сильно меняться в зависимости от используемого окуляра. Например, детали на Луне, сильно контрастные, могут выдержать большие увеличения, но этого нельзя сказать о планетах с малоконтрастными деталями, как Марс или Сатурн. Можно убедиться в различии контраста при наблюдениях на двух инструментах, используя одно и то же увеличение для телескопа и его искателя. В обоих случаях планета видна под одним и тем же углом, но больший инструмент дает изображение с большим контрастом, чем меньший, в который диск планеты кажется тусклым и поблекшим.

Мы не будем останавливаться подробно на фотографических наблюдениях протяженных объектов. Отметим только, что светосила Γ_p , пропорциональна площади объектива и обратно пропорциональна площади изображения. В отличие от визуальных наблюдений в данном случае приходится иметь дело с линейными, а не с угловыми размерами изображения. Можно, следовательно, записать

$$\Gamma_p = (D/F)^2 = 1/m^2. \quad (2.11)$$

При фотографических наблюдениях светосила равна квадрату

относительного отверстия. Два объектива с одинаковым относительным отверстием имеют одинаковую светосилу. Требуется одно и то же время экспозиции, чтобы с такими объективами сфотографировать довольно протяженный объект или фон неба. Но чем больше объектив, тем больше изображение.

Два снимка одной и той же области неба, полученные двумя объективами с одинаковыми апертурами, но с разными относительными отверстиями, не будут похожи. Короткофокусный инструмент позволит обнаружить туманность, но он более чувствителен к интенсивности свечения фона неба; с другим объективом различима более тонкая структура, но в ущерб контрасту. Следующая таблица резюмирует эти рассуждения.

Таблица 2

	Апертура, см				
	5	10	50	100	150
Разрешающая способность	2,4"	1,2"	0,24"	0,12"	0,08"
Предельная звездная величина	10,6 ^m	12,1 ^m	15,6 ^m	17,1 ^m	18,0 ^m
Равноэзрачковое увеличение	8	17	83	167	250
Поле зрения при использовании окуляра с полем 40°	5°	2°20'	29'	14'	10'
Разрешающее увеличение	24	51	250	500	750
Поле зрения при использовании окуляра с полем 40°	1,7°	47'	10'	4,8'	3,2'
Максимальное увеличение	125	250	1250	2500	3750
Поле зрения при использовании окуляра с полем 40°	20'	9'	1,9'	1'	36"

КРАТКАЯ БИБЛИОГРАФИЯ

1. Bruhat G. Optique, 5e édition revue et complétée par A. Kastler, Masson, 1959.
2. Danjon A., Couder A. Lunettes et Télescopes, Editions de la Revue d'Optique théorique et expérimentale, 1935.
3. Françon M. Optique: formation et traitement des images, Masson, 1972.
4. Marechal A. Diffraction. Structure des images, Masson, 1970.

Глава 3

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

ВИЗУАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Принцип измерения двойной звезды

Измерение двойной звезды состоит в определении полярных координат спутника по отношению к главной звезде, принятой за начало отсчета.

Отсчет позиционного угла производится от направления на северный полюс мира (против часовой стрелки.— Ред.). Это направление никак не выделено в поле зрения инструмента. Было бы более логично использовать суточную траекторию в направлении восток—запад какой-либо звезды, расположенной на экваторе, как поступал в XVIII в. В. Гершель. Можно, следовательно, тщательно определить это суточное движение, много-кратно наблюдая прохождение звезды вдоль нити микрометра. Телескопы с экваториальной установкой имеют такое же движение, поэтому нужное направление можно определить раз и на всегда, лишь проверяя его время от времени. Направление север—юг перпендикулярно направлению суточного движения.

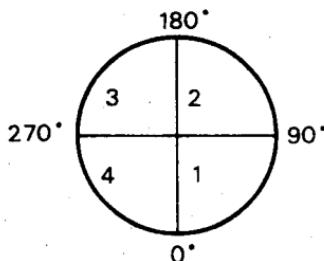


Рис. 3.1. Квадранты поля зрения телескопа.

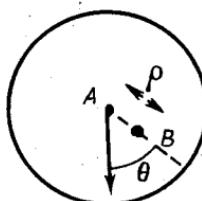


Рис. 3.2. Принцип измерения двойной звезды. А и В — компоненты пары, стрелка указывает направление на север, θ и ρ — измеряемые величины.

Поле зрения инструмента делится на четыре квадранта: первый — от точки севера к точке востока (от 0 до 90°), второй — от точки востока к точке юга (от 90 до 180°), третий — от точки юга к точке запада (от 180 до 270°) и четвертый — от точки запада к точке севера (от 270 до 360°) (рис. 3.1).

Угол между прямой, соединяющей компоненты пары, и направлением на северный полюс называется *позиционным углом* (рис. 3.2) и обычно обозначается греческой буквой θ . Угловое расстояние между компонентами, называемое *разделением* или просто *расстоянием*, измеряется в секундах дуги и обычно обозначается греческой буквой ρ . Полное измерение пары включает эпоху, выраженную в годах и в долях года, позиционный угол θ и разделение ρ .

Назначение микрометра состоит в измерении позиционного угла и разделения.

Необходимые меры предосторожности для определения начала отсчета углов

Не нужно забывать, что суточное движение звезд происходит не по большим кругам небесной сферы, за исключением объектов, расположенных точно на небесном экваторе. Отсюда следует, что звезды в поле зрения инструмента движутся не по прямым линиям. Строго говоря, нельзя изобразить суточное движение с помощью натянутой нити. Это отклонение от прямой мало и практически незаметно для звезд, расположенных достаточно далеко от полюса. Однако не следует регулировать и проверять микрометр по околополюсным звездам.

Необходимо убедиться в правильной ориентации полярной оси телескопа. Отклонение на несколько минут дуги уже существенно для измерений позиционных углов. Поскольку наблюдения двойных звезд должны производиться вблизи момента их кульминации, наибольшую ошибку вносит сдвиг полярной оси в направлении восток—запад. Этот сдвиг легко заметить и исправить, так как рефракция в этом направлении отсутствует. Это выполняется следующим образом. Наводят телескоп на звезду, ближайшую к небесному экватору и меридиану, совмещают ее с одной из нитей микрометра, ориентированной в направлении восток—запад, и наблюдают движение звезды. Если часовая ось ориентирована правильно, то звезда остается на нити. Если же по прошествии нескольких минут она сместится вверх или вниз от нити, значит, имеется сдвиг. В самом деле, телескоп в своем движении сканирует на небесной сфере круг, для которого полюс определяется пересечением продолжения полярной оси с небесной сферой, в то время как звезда следует по кругу, центрированному на истинный полюс. Можно рас-

смотреть коррекцию оси детально, используя соответствующие уравнения, но мы не будем на ней останавливаться, поскольку нас интересует лишь правильная установка телескопа, а не величина отклонения. Если звезда отклоняется к северу, значит, ось смещена к западу, в этом случае можно с помощью регулировочных винтов в опоре инструмента последовательными приближениями избавиться от этого смещения. Разумеется, полное исправление экваториальной установки включает в себя много других операций, описание деталей которых можно найти в монографиях, издаваемых Бельгийской королевской обсерваторией (Аренд [1]). Теоретически установка правильно установленного инструмента не должна меняться со временем, однако оседание почвы и микросейсмические колебания по прошествии десятилетий могут слегка изменять положение осей.

Изобретено большое число микрометров. Мы здесь опишем только те из них, которые используются для измерений двойных звезд. Они подразделяются на четыре типа: нитяные микрометры, микрометры со звездой сравнения, звездные интерферометры, микрометры двойного изображения.

Нитяные микрометры

Принцип этого прибора был предложен Озу в XVIII в. Из-за трудностей технического исполнения практическая реализация этой идеи была осуществлена лишь в эпоху В. Струве в XIX в. До этого времени астрономы располагали только меридианными кругами для определения положений светил, но такие инструменты не были пригодны для измерения малых углов. По-настоящему полезные наблюдения двойных звезд начали выполняться всего полтора века назад.

Нитяной микрометр состоит из подвижной металлической рамки, перемещающейся по двум направляющим, которые образуют большие стороны прямоугольника (рис. 3.3). Рамка и на-

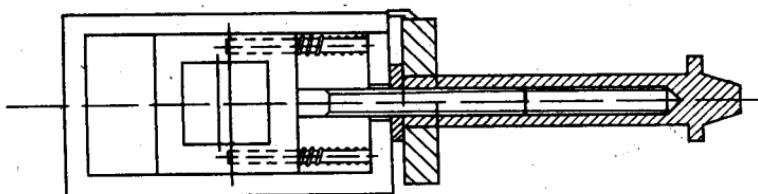


Рис. 3.3. Схема нитяного микрометра. Показаны две параллельные нити, одна из которых связана с подвижной рамкой, приводимой в движение микрометрическим винтом с оцифрованным барабаном. (Из книги Данжона и Кудэ «Телескопы».)

правляющие лежат в одной плоскости и должны располагаться в фокальной плоскости телескопа. Посередине между сторонами подвижной рамки натянут крест из очень тонких нитей, еще одна очень тонкая нить натянута между направляющими так, что одна из нитей рамки ей точно параллельна. Рамка перемещается вдоль направляющих, ее положение фиксируется компаратором или микрометрическим винтом, заканчивающимся разделенным барабаном. Весь прибор вращается с малым трением вокруг оптической оси. Нити изготавливаются из паутины или из нитей, выделяемых некоторыми видами гусениц. Промышленность выпускает в настоящее время нити из нейлона или кварца, не чувствительные к влажности и не подверженные старению, толщина

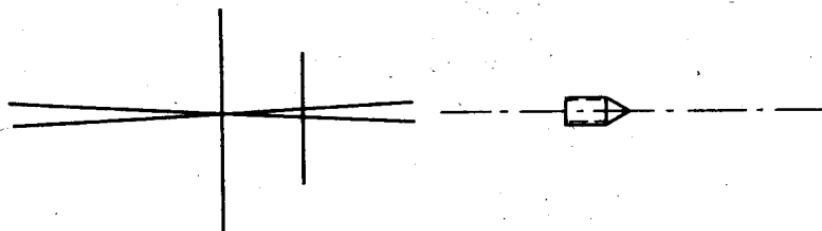


Рис. 3.4. Принцип работы микрометра с наклонными нитями. Две наклонные нити, связанные с подвижной рамкой, перемещаются относительно нити, перпендикулярной оси винта. (Рисунок из журнала наблюдений Жонкера.)

этих нитей порядка 7 мкм. В некоторых новейших микрометрах винт служит только для перемещения рамки, положение которой фиксируется и измеряется электронным прибором, соединенным со счетчиком-указателем и с помощью печатающего устройства фиксирующим перемещения каретки в микронах.

Некоторые наблюдатели, например Жонкер, предпочитали микрометр с наклонными нитями. В нем подвижная рамка несет две нити, образующие малый угол друг с другом и пересекающиеся в центре рамки (рис. 3.4). Направляющие несут нить, перпендикулярную биссектрисе малого угла; измерение в этом случае состоит в удержании изображения звездной пары на фиксированной нити и в перемещении подвижной рамки до тех пор, пока нити, образующие угол, не совпадут с изображениями звезд. Эта операция повторяется с каждой стороны от вершины угла. Таким образом удается измерить одновременно и разделение компонентов, и позиционный угол.

Таков очень простой принцип нитяного микрометра. Однако его практическое воплощение весьма сложно, поскольку, с одной стороны, все нити должны лежать в одной плоскости, что

недостижимо, а с другой — недопустим люфт в движении рамки и во вращении микрометрического винта.

Обычно нити устанавливают в одной плоскости путем тонкой регулировки наклона направляющих по отношению к плоскости подвижной рамки. Предел несовпадения плоскостей определяется глубиной поля зрения окуляра. С окуляром, имеющим фокусное расстояние 6 мм, допустимое значение составляет 50 мкм. Люфт рамки компенсируется упругими пластинками, мертвое время хода винта несущественно, когда измерения выполняются электронным устройством.

Видимость нитей в окуляре обеспечивается либо подсветкой поля зрения, либо подсветкой нитей. Для подсветки поля зрения объектив освещается лампой регулируемой яркости, расположенной недалеко от окуляра. Регулируемая подсветка нитей осуществляется с помощью слабого источника света, расположенного в плоскости нитей у края микрометра.

Позиционный угол измеряется путем визуальной оценки степени совпадения нити и прямой, соединяющей оба компонента. Обычно делается много отдельных измерений путем поворота микрометра вокруг оптической оси. Чтобы измерить разделение компонентов, нити ориентируют перпендикулярно прямой, соединяющей оба компонента, и наводят на каждый компонент. Затем снова наводят нити, вращая разделенный барабан. Разность отсчетов барабана пропорциональна разделению в секундах дуги.

Чтобы добиться высокой точности при измерениях с нитяным микрометром, необходимо соблюдать ряд предосторожностей. Напомним некоторые из них.

1. *Установка нитей микрометра в фокальной плоскости телескопа.* При этом исключаются два источника систематических ошибок: эффект параллакса, связанный с несовпадением изображения звезды и креста нитей, и ошибка в определении фокусного расстояния инструмента. Эти источники ошибок, особенно первый, в случае изображений, удаленных одно от другого, когда пара разделенная, весьма существенны и могут достигать 10 %. В наличии эффекта параллакса можно убедиться, рассматривая изображение около нити и слегка двигая головой. Если положение фокуса определено неправильно, что бывает достаточно часто в телескопах-искателях, то будет казаться, что звезда и нить меняют свое относительное положение. В этом случае нужно отфокусировать окуляр на нить, а затем навести микрометр на звездное изображение. Допустимый предел ошибки в определении положения фокуса в большом рефракторе составляет несколько десятых миллиметра.

2. *Калибровка микрометрического винта.* До последнего времени нитяные микрометры были снабжены микрометрическими

винтами. Этот принцип не совсем логичен, поскольку микрометрический винт движет рамку и в то же время измеряет ее смещение, что неразумно, так как измерительный прибор не должен использоваться для целей, иных, чем измерение. Ошибки винта являются систематическими (износ резьбы), они зависят от используемой части винта (растяжение) и температуры.

Учет этих ошибок весьма сложен, он состоит в тщательном исследовании шага винта и переводе его в секунды дуги. Для начала можно получить очень хорошую оценку, разделив длину шага на фокусное расстояние, выраженное в тех же единицах. Таким образом найдем приближенное значение шага в радианах, затем, умножив на 206265,— в секундах дуги. Более точное определение шага выполняется путем многократных наблюдений пар с хорошо известным разделением или лучше измерением времени, которое затрачивает звезда, чтобы пересечь расстояние между двумя нитями, разделенными известным числом поворотов винта. Хорошие фотографии звездного поля, например Плеяд, позволяют определить фокусное расстояние и масштаб снимка.

Вместо микрометренного винта предпочтительнее использовать компаратор. В продаже имеются хорошие приборы, градуированные с шагом 10 мкм и позволяющие с легкостью делать отсчеты до 1 мкм. Рефракторы с апертурами 50 и 74 см обсерватории в Ницце снабжены помимо микрометренных винтов компараторами и электронными измерительными приборами. Кроме того, эти приборы могут легко сменяться, поскольку они расположены вне микрометра. Их применение исключает источники собственных ошибок винтов.

3. *Подсветка нитей.* Окуляры не являются полностью ахроматическими системами, фокусные расстояния для различных длин волн различаются, хотя и незначительно. Поэтому освещать нити нужно белым светом, в противном случае будет заметно различие в фокусных расстояниях между звездой и нитью; эта ошибка носит название aberrации увеличения. Она исключается в случае подсветки поля, но тогда становится трудно наблюдать слабые звезды.

Подсветка нитей является источником паразитного света. Он примешивается к свету на выходе из окуляра, причем не только к свету в выходном зрачке, но и во всем выходном отверстии окуляра. Нужно, следовательно, побеспокоиться, чтобы выходное отверстие окуляра несильно превосходило по размерам выходной зрачок, чтобы экранировать лишний свет. Это условие редко выполняется в окулярах, которые имеются в продаже.

4. *Контроль параллельности нитей и линии, соединяющей звезды.* При измерении позиционного угла прямая, соединяющая зрачки глаз, должна быть параллельна или перпендику-

лярна прямой, соединяющей светила. Это не всегда осуществимо, поскольку при некоторых углах положение головы оказывается очень неудобным. Некоторые наблюдатели используют призму полного внутреннего отражения, которая изменяет позиционный угол известным образом, но это связано с потерями света и усложнением монтировки окуляра. Такие призменные компенсаторы почти не используются.

5. *Контроль биссектирования* (деления изображения на две равные части). Принцип измерения состоит в делении изображения звезды на две равные части. Это довольно трудная операция из-за дрожания самого прибора или из-за атмосферных помех, способных вызывать смещения, часто достигающие заметной доли измеряемых расстояний.

Во время измерения изображение должно удерживаться в одной и той же области поля зрения, лучше всего вблизи его центра, чтобы избежать ошибки, связанной с непараллельностью нитей. Биссектирование невозможно, если изображения неполностью разрешаются из-за дифракционных явлений. Эти трудности хорошо знакомы наблюдателям двойных звезд. Весьма затруднительно измерять разделение компонентов, когда атмосферная турбулентность совместно с дифракцией не позволяет видеть компоненты системы раздельно. Если влияние атмосферной турбулентности слабо, то можно получить хорошую оценку разделения по виду дифракционного диска, но такое измерение уже не будет микрометрическим.

Нитяной микрометр используется большинством наблюдателей, по крайней мере девятью из каждого десяти, поскольку его главное достоинство состоит в том, что непосредственно измеряется изображение, даваемое объективом. Но характер измерений на этих приборах не является объективным в отличие от современных приборов — звездных интерферометров и микрометров двойного изображения. Чтобы добиться с нитяными микрометрами хороших результатов, требуются годы практики, поскольку биссектирование изображения — операция, весьма тонкая. Измерение двойной звезды — это особый вид наблюдений, качество которых больше зависит от аккуратности наблюдателя, чем от мощности инструмента. По сравнению с фотографическими методами выигрыш в данном случае очевиден, так как измеряются изображения, структуру которых можно видеть, но нельзя сфотографировать.

Микрометры со звездой сравнения

Мы не будем подробно описывать эти приборы, которые, насколько нам известно, не используются в настоящее время. Хорошее их описание можно найти в книге Бэза [2].

В таком приборе используются две искусственные звезды с переменными и проградуированными разделениями и ориентациями, с которыми сравнивается измеряемая пара. В модификации Дэвидсона и Симмса (1931) свет точечного источника проходит сквозь призму Волластона, дающую два изображения, интенсивность которых зависит от расстояния между источником и призмой. С помощью скрещенных призм Николя можно менять интенсивность изображений. Вся система может поворачиваться вокруг оси; свет направляется в телескоп с помощью зеркал. Это очень остроумное устройство не имеет, однако, приверженцев, даже его авторы очень мало им пользовались.

Напротив, микрометр Дюрюи (1937) использовался его создателем в течение многих лет. Это бинокулярная система — один глаз смотрит в телескоп, другой — в визирное устройство, в котором видно изображение искусственной двойной звезды — двух белых точек, разделение и ориентацию которых можно менять. Несмотря на сложность процесса измерения (один глаз наблюдает, а другой сравнивает), наблюдения с этим прибором были многочисленны. Часто на нем выполнялись наблюдения объектов, труднодоступных для телескопа с апертурой 25 см, который был в распоряжении автора конструкции.

Звездные интерферометры. Интерферометр Физо—Майкельсона

Микрометр со звездой сравнения, так же как и нитяные микрометры, неудобен в употреблении, когда компоненты пары слишком близки друг к другу, чтобы их можно было видеть раздельно. Для этого случая Физо предложил устанавливать перед объективом экран с отверстиями. Свет от точечного источника, пройдя через отверстия, испытывает дифракцию и дает интерференционную картину в фокальной плоскости.

Чтобы уменьшить громоздкость установки, перед объективом или перед фокальной плоскостью располагают экран с двумя одинаковыми узкими щелями, симметричными по отношению к оптической оси, расстояние между которыми можно изменять. В фокальной плоскости собирается свет от каждого отверстия. Для данной ориентации щелей разность хода волн есть функция расстояния от оптической оси, поэтому наблюдаются интерференционные полосы.

Легко показать, что расстояние между полосами, выраженное в радианах, равно λ/D (ср. с величиной $1,22 \lambda/D$ — угловым радиусом дифракционного диска). Изменяя расстояние между отверстиями и их ориентацию, можно совместить темные полосы от одного компонента двойной системы со светлыми полосами

от другого при условии, что компоненты ярки и имеют примерно одинаковый блеск. Когда интерференционная картина исчезает, наблюдатель отмечает ориентацию и расстояние между щелями.

Этот микрометр позволяет измерять при разделениях компонентов, меньших, чем разрешающая способность. Он позволил Финсену открыть пары, в высшей степени тесные, одна из которых имеет самый короткий период (1,59 года) из всех известных визуально-двойных звезд. Другие наблюдатели, например Джейферс, получили не менее великолепные результаты. Хотя звездный интерферометр имеет большие преимущества при наблюдении тесных систем, он не лишен недостатков: потери света в приборе из-за экранирования большей части светового пучка, падающего на объектив, большое число интерференционных полос, уменьшающих контраст изображения. Эти соображения привели Данжона [5] к изобретению звездного интерферометра большей светосилы и с одной интерференционной полосой.

Интерференционный микрометр, работающий в режиме полуволны

Перед объективом помещается компенсатор Жамэна, состоящий из двух стеклянных пластинок, плоскопараллельных и наклоненных под малым углом друг к другу. Благодаря этому небольшому наклону на выходе из пластинок свет имеет некоторую разность фаз. Пластинки устанавливают так, чтобы разность хода была равна половине длины волны. Изображение приобретает вид двойного светлого пятна с темной полосой посередине (рис. 3.5). Диафрагма, помещенная перед объективом, определяет контуры изображения. Угловые размеры двойного пятна обратно пропорциональны отверстию диафрагмы. Весь

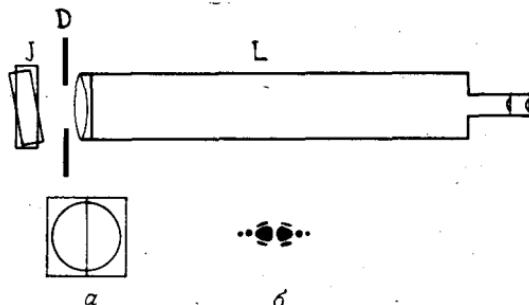


Рис. 3.5. Принцип работы звездного интерферометра Данжона. а — компенсатор Жамэна (J), состоящий из двух одинаковых плоскопараллельных пластинок, которые помещаются перед объективом, б — диафрагма (D) ограничивает отверстие и изменяет вид изображения. (Рисунок заимствован из *Ann. Obs. Strasbourg*.)

прибор может поворачиваться вокруг оптической оси. Чтобы обеспечить более четкий вид изображения, диафрагма делается квадратной.

Двойная звезда дает систему из двух изображений с темной полосой. Ориентируя соответствующим образом прибор и постепенно открывая диафрагму, наблюдают сначала четкую полосу, которая размывается и исчезает, когда изображение показывает то же разделение, что и компоненты двойной. Это имеет место при

$$\rho = 0,77\lambda/d, \quad (3.1)$$

где d — длина стороны диафрагмы. Минимальное разделение имеет место, когда размер диафрагмы объектива равен его диаметру, и в этом случае можно записать

$$\rho_{\min} = 1,09\lambda/D, \quad (3.1')$$

где D — диаметр объектива. Таким образом можно практически достичь разрешающей способности объектива.

Как и микрометр двойного изображения, этот прибор может служить для измерения разделенных или тесных пар. Поворачивая микрометр и открывая постепенно диафрагму, можно формировать геометрические фигуры с четырьмя изображениями, соединенными по два, квадраты, ромбы, по которым легче всего судить о правильности картины. Таким путем можно достичь высокой точности.

Изобретатель этого микрометра измерил сотни пар на рефракторе с апертурой 49 см в Страсбурге, внеся важный вклад в повышение точности измерений. Преимущество этого звездного интерферометра по сравнению с интерферометром Физо—Майкельсона состоит в большем количестве света и в более высоком контрасте изображения, что достигается благодаря одной полосе. Тем не менее этот прибор экранирует часть пучка света, падающего на объектив, но потери зависят от конкретной двойной звезды. Данжон пользовался главным образом своим микрометром двойного изображения, что привело Мюллера к изобретению нового типа такого микрометра.

Микрометр двойного изображения Мюллера

Теория этого прибора, над которым Мюллер работал с 1937 г., была разработана в 1947 г. [13]. Мы остановимся несколько более подробно на описании этого прибора, поскольку он весьма распространен благодаря простоте конструкции.

Мюллер поместил две полупризмы двойного лучепреломления вблизи фокальной плоскости объектива. Полупризмы, склеенные друг с другом, имеют оптические оси, расположенные в одной

плоскости с линией главного разреза. Оси составляют угол 45° с плоскостью падения и выходной плоскостью. Поэтому световой луч, падающий на призму почти нормально, разделяется на два луча — обычный и необычный, которые выходят параллельно друг другу, причем расстояние между ними меняется в зависимости от перемещения призмы поперек пучка.

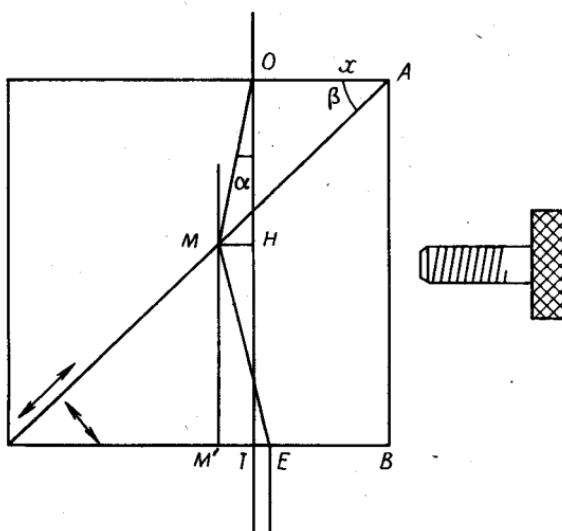


Рис. 3.6. Призма Мюллера. Две склеенные кварцевые призмы с оптическими осями, нормальной и параллельной плоскости разреза, которая составляет с плоскостью падения угол β . Необыкновенный луч проходит через точки O, M, E и выходит параллельно обычному лучу. Их разделение пропорционально смещению $OA = x$, осуществляющему микрометрическим винтом с оцифрованным барабаном.

Нетрудно вывести соответствующую формулу (рис. 3.6). Пусть OI — обычный луч, OME — необыкновенный луч, который преломляется на угол α на плоскости падения, на угол 2α на плоскости разреза и еще раз на угол α на выходной плоскости. Пусть $AB = 2l$ — толщина призмы двойного лучепреломления. Спроектируем точку M в H на прямой OI и обозначим $OA = x$. Эта величина равна линейному смещению луча призмой. Угол α мал, следовательно, можно ограничиться величинами первого порядка малости

$$OM \approx OH \approx x \operatorname{tg} \beta \approx x, \text{ так как } \beta = 45^\circ.$$

Для точки M' , проекции точки M на выходную плоскость, имеем

$$EI = EM' - IM' = EM' - HM.$$

Поскольку $HM = \alpha x$ и $EM' = (2l - x)\alpha$, при $\beta = 45^\circ$ имеем
 $EI = 2l\alpha - 2\alpha x$. (3.2)

Строгий расчет дает

$$EI = 2l \operatorname{tg} \alpha - 2x \frac{\sin \beta}{\cos(\beta + \alpha)} \sin \alpha. \quad (3.2')$$

Величина $\gamma = 2\alpha = 2(n_o - n_e)/n_o$ постоянна, n_o , n_e — коэффициенты преломления кварцевой призмы Мюллера для обычного и необыкновенного лучей соответственно. Величина, обратная этой постоянной, называется увеличением и составляет для кварца 84,0. Можно видеть, что $EI = 0$ для $x = 1$.

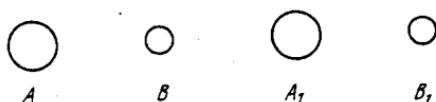


Рис. 3.7. Выстраивание изображений в ряд (метод 4d).



Рис. 3.8. Выстраивание изображений в ряд (метод 1d).

Изображения совпадают, если свет входит в призму в середине плоскости падения, раздвоение изображения пропорционально смещению призмы, умноженному на γ . Это эквивалентно обороту винта, деленному на увеличение. Если T_0 — следующий оборот винта, то

$$T_0 = \gamma T. \quad (3.3)$$

Но раздвоение будет неодинаково для разных звезд в поле зрения, и, строго говоря, даже для компонентов пары. Этот эффект называется микрометрическим дифференциальным эффектом.

Чтобы измерить пару, располагают компоненты изображения в ряд или в виде квадрата. В первом случае все четыре изображения A , B и A_1 , B_1 стараются расположить на одной прямой по обе стороны от центра поля зрения (рис. 3.7) и на одинаковых расстояниях друг от друга, либо разделяя полностью четыре изображения (метод 4d, где d — расстояние между звездами), либо налагая их друг на друга (метод одинарного расстояния, рис. 3.8). Из-за дифференциального микрометрического эффекта точное равенство расстояний невозможно, но это уклонение незаметно для глаза, и поворот винта записывается в виде

$$T_1 = T_0 (1 - \gamma/2). \quad (3.4)$$

Таким методом расположения в ряд (методом выравнивания) позиционный угол измеряется с большой точностью.

При расположении изображений в виде квадрата (рис. 3.9) дифференциальный микрометрический эффект не играет роли, и поворот винта остается равным T_0 . Расположение в виде квадрата удобно для измерения тесных пар.

Дифференциальный микрометрический эффект можно свести к нулю, используя призменный компенсатор. Это такая же призма, но перевернутая и достаточно малых размеров, чтобы ее

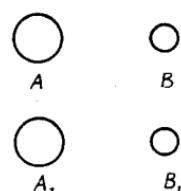


Рис. 3.9. Расположение изображений в виде квадрата.

можно было поместить в монтировке окуляра. Можно показать простым вычислением, что в этом случае звезды поля имеют примерно одинаковые раздвоения и оборот винта выражается в виде $T_0 = \gamma T$ для всех методов измерений. Строго говоря, в этом случае остается малый микрометрический эффект, обусловленный дифференциальным наклонением пучка по отношению к призме. Этот эффект, однако, никогда не превышает одной тысячной измеряемой величины. Отметим, наконец, что это окулярное устройство является микроскопом, поскольку фокальная плоскость находится внутри призмы, что не позволяет менять увеличение при помощи окуляров.

Можно легко и с малыми затратами построить этот прибор, поместив призму вместо нитей в рамку обычного микрометра и заменив окуляр микроскопом. В этом случае поле зрения не превышает $1'$, что однако не является большей помехой для наблюдений. Микрометр Мюллера используется на многих обсерваториях. Принцип измерения, состоящий в выравнивании положений изображений и расположении их на одинаковых расстояниях, великоделен для глаза, хорошо приспособленного для таких сравнений. Результаты наблюдений показывают, что наблюдатель быстро привыкает к прибору, всякого рода ошибки оказываются меньше, чем при работе с нитяными микрометрами, результаты менее чувствительны к качеству изображения. Этот микрометр может использоваться также для пар, более слабых чем доступные звездным интерферометрам, поскольку в данном случае используется весь свет, прошедший через объектив.

Поскольку выходящие пучки поляризованы в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, достаточно поместить полярид

между призмой и микроскопом, чтобы преобразовать прибор в фотометр. Вращая поляроид, можно попарно уравнять яркости изображений. Измеряя угол поворота, можно выразить результат измерения в разностях звездных величин. Используя светофильтры, можно проводить подобные наблюдения в нескольких спектральных полосах. Мюллер выполнил многочисленные фотометрические наблюдения с этим инструментом.

Микрометр двойного изображения Лио и Камишеля

Это микрометр двойного изображения, изготовленный из целого кристалла исландского шпата с параллельными гранями, наклоненными к оптической оси инструмента. Поворачивая микрометр и наклоняя его, можно определить позиционный угол и разделение компонентов пары путем сравнения величины раздвоения изображения, вызванного двойным лучепреломлением, с характеристиками звездной пары, но раздвоение при этом не будет пропорционально отсчету. Авторы не дают никаких других указаний относительно этого прибора, который использовался в обсерватории Пик-дю-Миди [4]. Этот микрометр, очень простой в исполнении, достоин широкого распространения, так как позволяет производить очень точные измерения.

ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Мы очень кратко остановимся на этой теме, которая является разделом фотографической астрометрии, а не визуальных наблюдений.

Оптическая фотонная камера

Фотография плохо подходит для наблюдений тесных пар, поскольку размеры изображений звезд на пластинке гораздо больше, чем дифракционные изображения. Размеры дифракционного изображения составляют около 20 мкм для длиннофокусных инструментов, а размеры фотографического изображения часто достигают 100 мкм. Можно предварительно увеличить изображение, прежде чем направить его на пластинку, но при этом параметры оптической системы трудны для определения. Поэтому в фотографической астрометрии используются рефракторы с хорошо известным фокусным расстоянием, или же

работа производится в первичных фокусах некоторых рефлекторов.

При разделениях меньше 100 мкм изображения компонентов перекрываются и их интенсивности частично складываются. В этом случае, изучая фотографическое изображение, мы увидим максимум почернения — фотоцентр. Положение фотоцентра не соответствует ни положению одного из компонентов, ни положению центров масс. Его расстояние PA от главного компонента равно

$$PA = AB l_B / (l_A + l_B), \quad (3.5)$$

где l_A и l_B — блеск компонентов A и B , AB — расстояние между ними (рис. 3.10). Фотоцентр описывает орбиту, являющуюся

Рис. 3.10. Фотоцентр. A и B — неразделенные изображения компонентов, P — положение максимума фотографической плотности.



гомотетическим преобразованием орбит звезд A и B вокруг центра масс системы. Некоторые двойные звезды имеют невидимые спутники, обнаружимые фотографически благодаря движению фотоцентра. Такие звезды называются астрометрическими двойными. Формула (3.5) не вполне точна, поскольку теория формирования фотографического изображения двойного источника еще плохо разработана. Тем не менее надежные сведения о массах звезд связаны с решением этой проблемы. Морель [12] внес большой вклад в ее решение. Большим специалистом по изучению невидимых компонентов в двойных системах является ван де Камп в США [9]. Этот астроном открыл около десятка невидимых спутников звезд, некоторые из них являются, возможно, планетами, более массивными, чем Юпитер.

Известно много пар, достаточно разделенных, чтобы их можно было наблюдать фотографическими методами, имеющими важные преимущества перед визуальными методами: высокую чувствительность и документальность.

При малом разделении компонентов можно заменить пластиинку кинопленкой и сделать большое число снимков. Суточное движение позволяет сфотографировать треки звезд. Экспозиции должны быть короткими, от нескольких секунд до минуты, чтобы избежать размытия изображения звезд на пленке или на пластинке вследствие атмосферной турбулентности (рис. 3.11).

Герцшprung, а затем Странд предложил натягивать перед объективом сетку из параллельных нитей. По своему действию она подобна дифракционной решетке и приводит к образованию около центрального изображения небольших спектров. Если a — расстояние между серединами двух соседних нитей, то

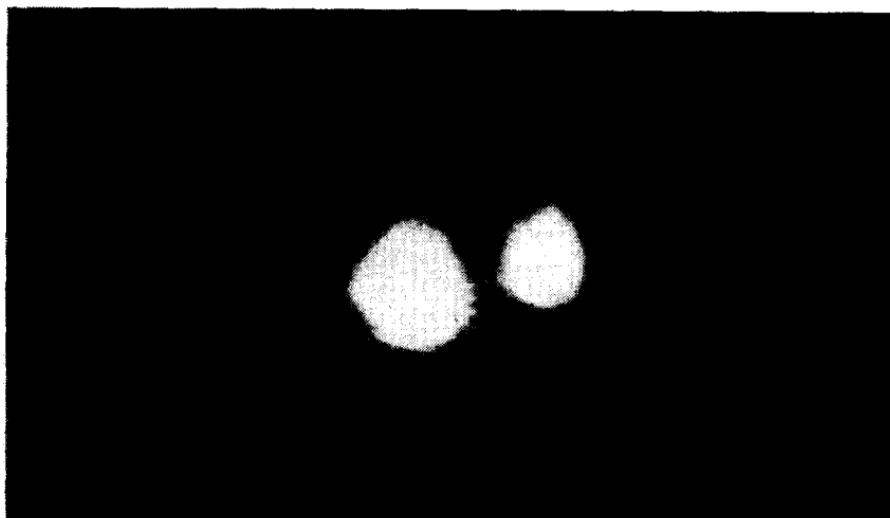


Рис. 3.11. Фотография двойной звезды ADS 2799 = ОΣ 65 α = 3^h47^m03^s, δ = + 25°26' (1950). Рефрактор апертурой 50 см, экспозиция 1с 1967, 818, позиционный угол 203,9°, разделение 0,65'', звездная величина 6,5 и 6,8''. Фокусное расстояние 22,5 м, увеличение 300 раз, расстояние между центрами изображений 72 мкм. (Фотография Фоссата, обсерватория в Ницце.)

спектры первого порядка располагаются на угловом расстоянии

$$d = \lambda/a \quad (3.6)$$

от центрального изображения. Эти маленькие спектры являются очень короткими, особенно если телескоп снабжен желтым фильтром. Если промежутки между нитями составляют 1 см, то спектры первого порядка расположены на угловом расстоянии 11,5'' от центрального изображения. Если увеличивать толщину нитей по сравнению с промежутками между ними, то яркость спектров возрастет, а центральное изображение станет слабее. Положение спектров первого порядка позволяет с большой точностью определить положение центрального изображения. Этот прием очень полезен в случае, когда компоненты пары сильно различаются по блеску. Ориентация сетки нитей позволяет хорошо определить направление суточного движения, а промежуток между нитями позволяет определить масштаб расстояний. Дюрюи с успехом использует дифракционные решетки на своей обсерватории в Рурете для измерения двойных звезд с рефлектором 60 см.

Оптическая электронная камера

Работа электронной камеры основана на фотоэлектрическом принципе. Поток фотонов, падающий на металлическую пластинку, выбивает из нее электроны. Таким образом, энергия

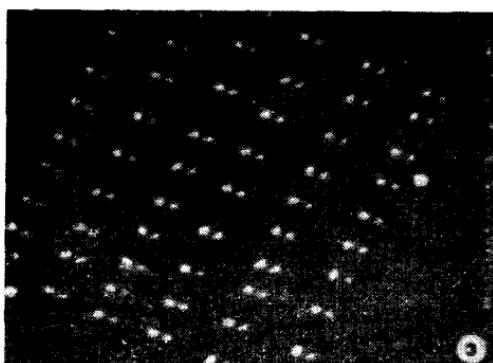


Рис. 3.12. Электронографическая пластина *Ilford G-5* с серией изображений визуально-двойных звезд. В правой и левой частях пластины видны два маленьких пятнышка, которые служат реперами для определения начала отсчета позиционных углов. (Фотография и пояснение к ней сделаны Лякё).

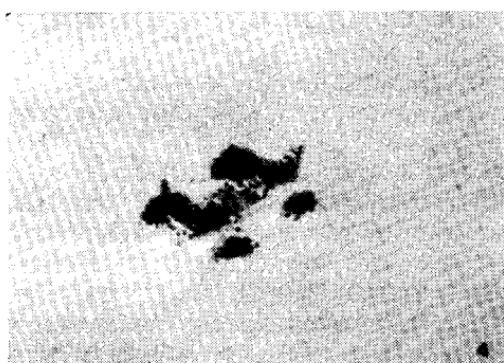


Рис. 3.13. Увеличенное изображение двойной с малым различием блеска компонентов Δm и разделением порядка $0,9''$. Видны, два хорошо разрешенных пятна, которые допускают удобное астрометрическое измерение. (Фото и пояснение к нему Лякё).

фотонов преобразуется в поток фотоэлектронов. Последний может быть усилен посредством микроканальной пластины. Пучки электронов с помощью электроннооптической системы образуют изображение объекта на фотопластинке.

С такой аппаратурой возможны экспозиции, в 25 раз более короткие по сравнению с обычной фотографией. Лякё на обсерватории Пик-дю-Миди применил ее для измерения двойных звезд. Короткие экспозиции дают мгновенное изображение, что позволяет свести к минимуму искажения, вызванные волнением атмосферы. Кроме того, эта система в противоположность классической фотографии обладает линейной характеристикой, что позволяет выполнять хорошие фотометрические измерения (рис. 3.12).

Однако в этом случае существуют трудности, связанные с контролем дисторсии. Электронные фотографии эталонных решеток позволяют хорошо определить константы поля, в частности эквивалентное фокусное расстояние (рис. 3.12 и 3.13).

Электронная фотография (или электронография) позволила получить изображения дифракционных колец благодаря малому времени экспозиции, часто меньшему, чем длительность случайных атмосферных волнений. Впрочем, это волнение «вмораживается» на фотопластинке: изображения обоих компонентов двойной звезды одинаково деформированы, что не мешает точному измерению их относительного расположения.

СОВРЕМЕННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ

Автоматический интерферометр Уикса

Принцип интерферометра Физо—Майкельсона был снова взят на вооружение в последнее время Уиксом [15], а затем Лябери [10].

Система Уикса включает щелевой интерферометр Юнга. Изображение звезды выделяется в фокусе телескопа, затем пучок лучей, преобразованный в параллельный, проходит через поворотную призму полного внутреннего отражения. С помощью этой призмы пучок поворачивается вокруг своей оси и проходит сквозь экран с двумя щелями. Поворачивающиеся интерференционные полосы, получаемые таким образом, падают на экран с радиальными прозрачными и непрозрачными полосами, и это изображение анализируется фотоэлектронной системой.

В конечном счете глаз в этом случае заменяется системой, более чувствительной и менее инерционной. Разрешающая способность такой системы ненамного лучше, чем у глаза, но ей доступны гораздо более слабые объекты. Более того, информация регистрируется и может быть использована в любой момент времени.

Интерферометр Лябери (счетчик фотонов)

Наиболее глубоко эта проблема разработана Лябери с сотрудниками [10], которые используют для измерений полное изображение при полном отверстии объектива.

Лябери изучил сначала, как формируется изображение одиночной звезды, искаженное атмосферой, в фокусе большого телескопа. Киносъемки позволили детально изучить сложную структуру этого изображения, подобного грозди винограда, каждая виноградинка которой подвержена очень быстрым движениям и имеет очень малое время жизни.

Лябери с сотрудниками исходили из того, что это изображение есть результат интерференции падающего пучка со случайными пространственными фазовыми флуктуациями. Каждое пятно представляет собой фурье-образ входного зрачка телескопа, т. е. в сущности дифракционное изображение звезды. В случае двойной звезды каждое пятно несет информацию о двойственности, так же как и весь ансамбль пятен, но разделение компонентов очень мало, меньше, чем размеры дифракционного изображения. Если рассматривать фотографию, содержащую информацию об изображении двойной звезды, в когерентном пучке света, то будет наблюдаться интерференционная картина. Можно показать, что разделение компонентов пары выражается формулой

$$\rho = \lambda_0 (f'/s) f, \quad (3.7)$$

где λ_0 — длина волны когерентного пучка, s — расстояние между интерференционными полосами, f' и f — эквивалентные фокусные расстояния телескопа и устройства для создания фурье-образа.

Этот метод применялся его авторами на 5-метровом рефлекторе обсерватории Маунт-Паломар. Они сделали большое число фотографий (более ста) исследуемых звезд с экспозициями от 0,1 до 0,001 с. Эквивалентное фокусное расстояние составляло 889 м, что соответствует масштабу 2,5'' на 1 см. Каждая фотография просвечивалась пучком когерентного света, и получалась идентичная интерференционная картина (рис. 3.14), но малоконтрастная; суммирование всех таких фотографий на одной пластинке увеличивает контраст. Подобные операции проводились и с одиночной звездой сравнения, имеющей такой же блеск и такое же зенитное расстояние. Каждая точка в распределении интенсивности по изображению, обусловленная двумя звездами, сопоставляется с распределением интенсивности для звезды сравнения. Это дает кривую видимости интерференционных полос, аналогичную кривой в теории интерферометра Физо—Майкельсона. Обработка результатов с помощью автокорреля-

ционного анализа позволяет восстановить изображение пары, сохраняя отношение блеска компонентов.

Такая процедура занимает много времени, но она позволяет извлечь из наблюдений такую информацию, которую дало бы неискаженное изображение. Она позволила достичь теоретической разрешающей способности 5-метрового телескопа ($0,02''$) и измерять двойные с разностью блеска компонентов $5''$ (1972 г.).

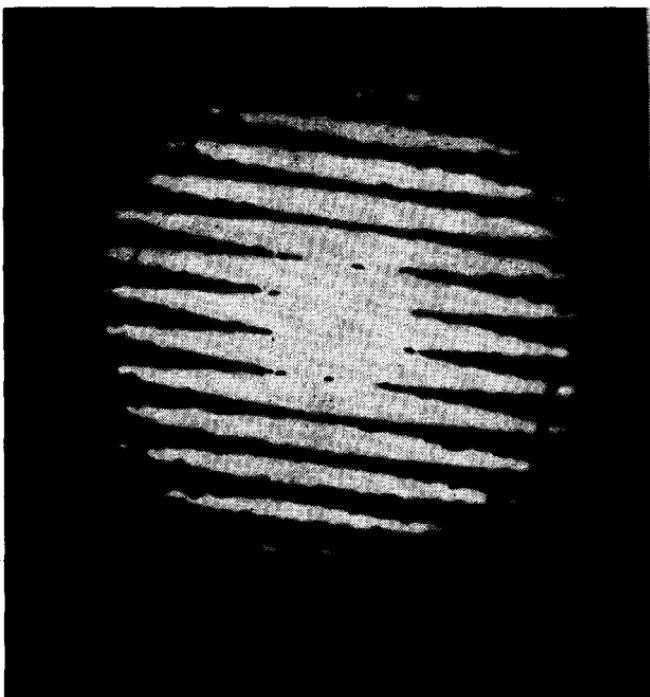


Рис. 3.14. Интерференционная картина изображения α Большой Медведицы. Получена сложением 50 фотографических изображений, снятых на 4-метровом рефлекторе обсерватории Китт-Пик. Угловое разделение компонентов составляет $0,272''$. (Фото Мак-Алистера, опубликованное в *Sky and Telescope*; с разрешения автора и издателя.)

Лябери и его сотрудники разрешили многие спектрально-двойные и астрометрические двойные, такие, как τ Персея, γ Персея, δ Скорпиона, χ Дракона, а также открыли новые двойные, такие, как β Цефея (рис. 3.15).

Наблюдения двойных звезд с теоретической разрешающей способностью больших телескопов становятся, таким образом, реальностью. Организации, планирующие программы наблюдений больших телескопов, поняли важность подобных исследова-

ний, и американские астрономы решили использовать для этой цели один из крупнейших телескопов — 4-метровый рефлектор Мейолла Национальной обсерватории Китт-Пик. Здесь Линдс и Мак-Алистер [11] регулярно наблюдают этим методом двойные звезды всех классов, несколько усовершенствовав метод Лябери. Ими разрешен ряд спектрально-двойных, таких, как 12 Персея, η Ориона, η и θ Девы.

Рис. 3.15. Изображение β Северной Короны, полученное методом автокорреляционного анализа. Север внизу. Позиционный угол спутника 150° , расстояние от главной звезды $0,30''$. (Фото Лябери, обсерватория Маунт-Паломар.)



Можно расширить возможности этого метода, если использовать два телескопа, расположенные на расстоянии во многие десятки метров друг от друга, или несколько телескопов, расположенных в вершинах правильного многоугольника, общее разрешение которых равно разрешению инструмента с зеркалом, эквивалентным по размеру суммарной апертуре всей системы телескопов. Установка из двух телескопов, разделенных расстоянием в десяток метров и работающих в комплексе, близка к завершению в Центре обучения и астрометрических и геодинамических исследований, расположенном около Граса (Франция).

Интерферометр интенсивностей Брауна

Браун, Дэвис и Аллен [3] на обсерватории Наррабри в Австралии методом, несколько отличным от описанного выше, получают результаты, не менее впечатляющие, чем Лябери. Они используют два подвижных зеркала, установленных на кольцевых рельсах и направляющих световые потоки, преобразованные в электрический ток, кциальному коррелятору. К сожалению, этот метод применим лишь к очень ярким звездам. Этот прибор позволил разрешить α Девы и уточнить ее расстояние от Солнца (84 парсека).

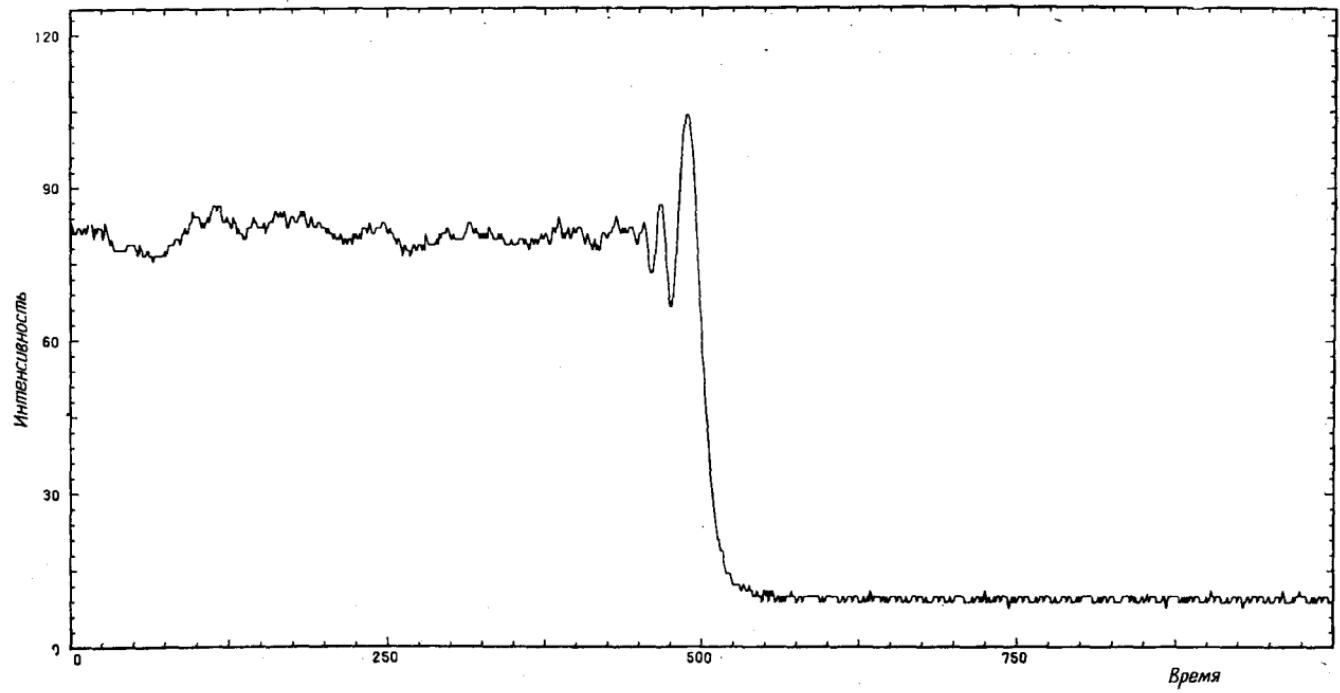


Рис. 3.16. Кривая блеска при покрытии Альциона Луной 11 сентября 1973 г. Эта кривая характерна для одиночной звезды. (Кривая получена Эвансом в Техасском университете.) По оси абсцисс отложено время в миллисекундах, по оси ординат — интенсивность в произвольном масштабе.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

НАБЛЮДЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД МЕТОДОМ ЛУННЫХ ПОКРЫТИЙ

Известно, что в силу крайней малости видимого диаметра звезды, покрываемая дискоом Луны, исчезает за ее краем практически мгновенно. Вообще говоря, компоненты двойной системы покрываются диском Луны последовательно, один за другим, в зависимости от их разделения и расположения относительно края Луны. В этом случае покрытие не является мгновенным, хотя это мало заметно визуально.

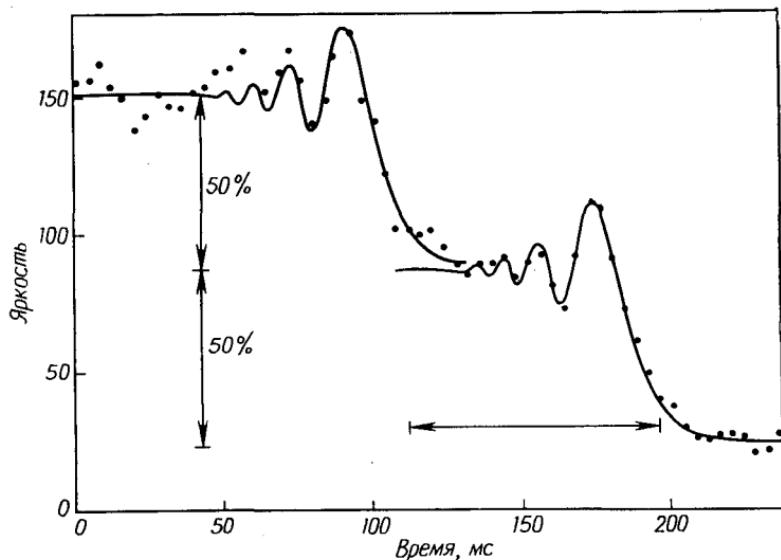


Рис. 3.17. Кривая блеска при покрытии Луной звезды BD + 28° 1138 26 марта 1969 г. Видна двойная система интерференционных полос. Два компонента отстоят друг от друга на 0,0258'', или 84,5 мс времени. Звездные величины компонентов 6,5 и 7,5^m. (Кривая получена Натером и Эвансом, опубликована в *Astrophysics and Space Science*.)

Большое временнное разрешение современных фотоэлектрических фотометров позволяет проследить в деталях все фазы покрытия, особенно фазы, соответствующие моментам касания. Если двойная звезда покрывается Луной, анализатор покажет два дифракционных изображения, более или менее наложившихся друг на друга, но все же различимых (рис. 3.16 и 3.17). Отсюда можно вывести блеск компонентов и проекцию на лунный диаметр разделения между ними. Если покрытие наблюдалось из двух различных мест, то можно получить разделение компонен-

тов и позиционный угол; при этом удается достичь точности $0,001''$.

Вот почему особенно интересно наблюдать покрытия на большом числе обсерваторий, расположенных в различных местах. Для этой цели была создана специальная ассоциация наблюдателей и издается журнал *Occultation Newsletter*. Эванс, Данхем, Африкано и другие наблюдатели на обсерватории Мак-Дональд в США открыли этим методом десятки очень тесных двойных. Одна из наиболее замечательных — Атлас в Плеядах, которая имеет спутник 5-й звездной величины, отстоящий от главной звезды на $0,004''$. Кроме того, лунные покрытия, так же как и интерферометрические методы, позволяют измерять диаметры звезд, малых планет и спутников планет Солнечной системы.

НАБЛЮДЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД МЕТОДОМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ

Этот метод напоминает метод лунных покрытий. Он разработан и применяется Ракосом [14] в Вене и Францем [7] во Флагстаффе.

В фокальной плоскости телескопа помещается экран с двумя узкими взаимно перпендикулярными щелями (рис. 3.18). Можно поворачивать экран, чтобы ориентировать щели в нужном положении, а также перемещать его в своей плоскости вдоль одной из биссектрис угла, образованного щелями. Плоскопараллельная стеклянная пластинка, помещенная перед экраном, отражает 5 % света и позволяет видеть звезду и гидировать ее по щелям.

Для наблюдений двойной звезды щели ориентируются таким образом, чтобы одна из них включала оба компонента, а затем перемещают экран. Оба компонента проходят сначала одновременно в одну щель, затем последовательно один за другим в другую щель. Соответствующая кривая изменения интенсивности регистрируется прибором. Профиль, соответствующий прохождению звезд через первую щель, соответствует одиночной звезде и служит как профиль сравнения. Анализ записи позволяет определить профили интенсивности обоих компонентов и их относительный блеск. С этой целью можно использовать преобразование Фурье или вычислять параметры двух функций, сумма которых наилучшим образом представляет профиль интенсивности двойной звезды. Ориентация щелей уже определяет угол, близкий к позиционному углу. Если компоненты пары слишком близки друг к другу, чтобы их можно было разрешить

непосредственно, выполняют большое число измерений, результат в этом случае получается путем несколько более длительной обработки.

Преимущество этого метода состоит в том, что удается определить одновременно координаты пары и разность блеска компонентов с точностью нескольких тысячных звездной величины.

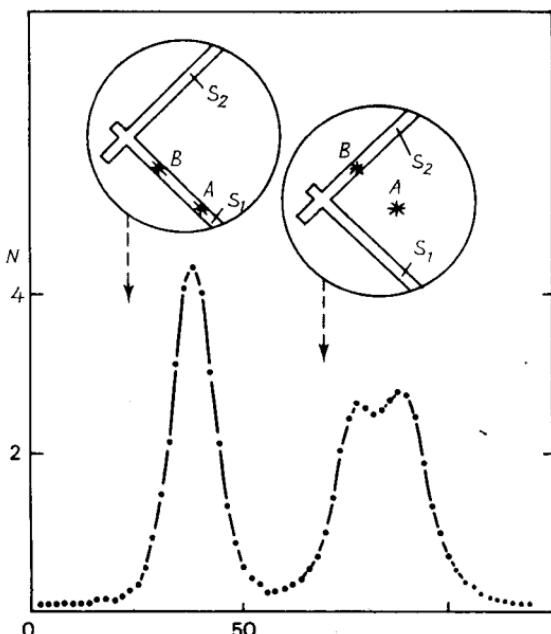


Рис. 3.18. Профиль интенсивности, полученный сканированием изображения двойной звезды. Две взаимно перпендикулярные щели S_1 и S_2 прорезаны в экране. Изображения обоих компонентов проваливаются одновременно в одну щель, при этом регистрируется максимум интенсивности, затем оба компонента последовательно проходят через вторую щель. Профили интенсивности при известной ориентации щелей позволяют определить измеряемые параметры. (Из *Proceeding of the astrometric conference* — трудов конференции, посвященной пуску в эксплуатацию 1-метрового телескопа в Турине, май 1974 г. [14].)

КРАТКАЯ БИБЛИОГРАФИЯ

1. Arend S. Réglage pratique de l'équatoriel visuel et de l'astrophotographie, Obs. Royal de Belgique. Monog., 2, 1951.
2. Baize P. Valeur comparée des mesures filaires et non-filiaires dans la mesure des distances d'étoiles doubles, J. des Obs., XXXII, No. 8, 9, 97, 1949.

3. *Brown R. H., Davis J., Allen L. R.* The Stellar Interferometer, I at Narrabri Observatory, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **137**, 375, 1967.
4. *Camichel H.* Mesures d'étoiles doubles faites au Pic du Midi, J. des Obs., XXXII, No. 8, 9, 94, 1949.
5. *Danjon A.* Description et théorie d'un micromètre interférentiel demi-onde. Ann. Obs. Strasbourg, III, 181, 1937.
6. *Evans D. H., Brown R. H., Davis J., Allen L. R.* A Study of γ Virginis with an intensity interferometer, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **151**, 161, 1971.
7. *Franz O. G.* A Photoelectric Area scanner for astrometry and photometry of visual double stars, Lick Obs. Bull., No. 154, 1970.
8. *Jonckheere R.* Un micromètre à fils obliques, J. des Obs. XXXIII, No. 4, 57, 1950.
9. *Van de Kamp P.* Principles of Astrometry, W. H. Freeman and Cie, London, 1967.
10. *Labeyrie A.* Observations interférométriques au Mont Palomar, Nouv. Revue d'Optique, VI, No. 1, 15, 1975.
11. *McAlister H. A.* Speckle interferometric measurements of binary stars, Astrophys. J., **215**, 159, 1977.
12. *Morel P. J.* Contribution à la détermination photographique du rapport des masses d'une binaire visuelle, Thèse de spécialité, Obs. de Nice, 1969.
13. *Muller P.* Sur un micromètre à double image, ses possibilités et quelques questions connexes, Bull. Astron., XIV, fasc. 3, 13, 1947.
14. *Rakos K. D.* Photometric and astrometric observations of close visual binaries, Obs. Turin. Coll. inaug. du télescope astrométrique, 1974.
15. *Wickes W. C., Dicke R. H.* An automatic interferometer for double stars observations, Astron. J., **78**, 757, 1973.

Глава 4

НЕСКОЛЬКО ПРАКТИЧЕСКИХ СОВЕТОВ

Мы кратко остановимся на нескольких методах наблюдений, уделив особое внимание нитяному микрометру, с которым выполнено наибольшее число измерений двойных звезд. Большинство выдающихся наблюдателей двойных звезд пользовались только нитяными микрометрами и никогда не применяли микрометры других типов.

В этой главе мы подробно опишем, как визуальный наблюдатель должен готовиться к наблюдениям. Эти советы основаны на более чем четвертьвековом опыте визуальных наблюдений двойных звезд. Наша цель состоит в том, чтобы направить работу молодого астронома, который только приступает к подобного рода наблюдениям. Опыт наблюдений не может быть изучен как теоретическая физика, а приобретается в течение ряда лет как ремесло. Все, что делает астроном под куполом своей обсерватории, несет его личную печать, так как результаты наблюдений будут опубликованы и оценены некоторое время спустя. Он сознает, что все наши астрономические знания, даже наиболее абстрактные, имеют в своей основе наблюдения. Он знает также, что хорошее измерение со временем будет использовано и что ошибка в наблюдении обязательно обнаружится.

Приготовления к наблюдательной ночи

Наблюдательная ночь была бы подобна серии лабораторных измерений, если бы не земная атмосфера, которая сильно ограничивает количество и качество результатов. Разного рода атмосферные возмущения носят общее наименование *турбулентность*. Это главная помеха наблюдениям, но она может быть уменьшена.

Турбулентность, которую мы изучим несколько более детально ниже, влияет на качество изображения на двух уровнях: в высоких слоях атмосферы, где дуют сильные ветры, и вблизи земли, где имеют место конвективные потоки, обусловленные перемешиванием теплого и холодного воздуха. Астроном не в со-

стоянии уменьшить турбулентность в высоких слоях атмосферы, но он может принять определенные меры, чтобы уменьшить потоки воздуха на уровне земли и в башне телескопа.

По ряду природных явлений наблюдатель может заранее судить, можно ли данной ночью ожидать хорошее качество изображения. Верным признаком является полное безветрие. Если

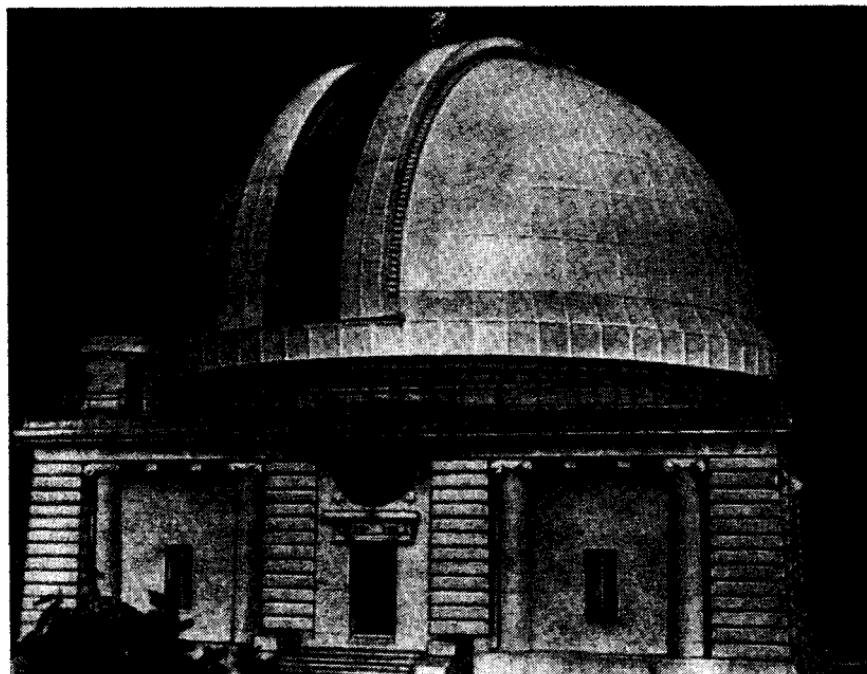


Рис. 4.1. Обсерватория в Ницце. Башня Бишофсхайма, в которой установлен большой рефрактор. Архитектор Гарнье, купол по проекту Эйффеля. (Фото обсерватории в Ницце.)

листья на концах веток деревьев и даже листья эвкалиптов, которые обычно колышутся при малейшем дуновении, остаются неподвижными, можно надеяться на хорошее качество изображения. В Ницце великолепным предсказателем погоды является море: оно должно представлять собой огромную плоскую поверхность, у берега не должно быть прибоя с белой каймой пены, а горизонт должен быть едва виден. Небо в зените не должно быть слишком синим. Если чувствуется запах растений и дым из труб едва поднимается вверх и даже стелится к земле, то имеется вероятность хорошего качества изображения. Естественно, чтобы судить о качестве изображения, можно наблюдать звезду днем, хотя турбулентность днем и в ночное время различна.

Планеты, как известно, в принципе не мерцают. Но при плохом качестве изображения Венера, Юпитер, Марс и Сатурн все-таки обнаруживают очень слабое мерцание, хорошо заметное близоруким, если смотреть на небо без очков. Полное отсутствие мерцаний — верный признак хорошего качества изображения.

Целесообразно открывать люк купола за час до начала наблюдений и ставить инструмент в почти вертикальное положение, сняв крышку с объектива. Длинная труба рефрактора, как воздушный шар, захватывает теплый воздух, который поднимается и скапливается позади объектива. Он охлаждается трубой и объективом, подвергаясь медленной циркуляции. Этот эффект очень заметен у большого рефрактора в Ницце, длина которого составляет 18 м. Это одно из соображений, по которому нужно держать трубы рефракторов в течение дня в горизонтальном положении. Следует избегать также, чтобы в люк и на купол попадали лучи заходящего Солнца. Правильно поступают те, кто проветривает башню перед наблюдениями, чтобы весь теплый воздух вышел из нее. Следует избегать присутствия в башне большого числа людей перед наблюдениями, поскольку тепло человеческого тела также способствует турбулентности и может повредить качеству изображения.

Данжон рекомендовал поливать купол водой, чтобы охладить его, однако это не всегда возможно. Широкие и хорошо политые газоны вокруг башен и деревья уменьшают тепловые потоки. Нельзя устраивать стоянки автомобилей под люком купола, так как их двигатели являются источниками тепла.

Вообще естественная растительность местности должна сохраняться. При отсутствии деревьев многочисленные строения благоприятствуют созданию восходящих токов теплого воздуха в начале ночи. На горных вершинах и на высоких плато качество изображения лучше, чем на склоне. Наблюдения двойных звезд требуют спокойной атмосферы, при этом легкая дымка не является помехой. Сильные ветры, которые очищают воздух от пыли и придают небу яркую голубизну, являются источником сильной турбулизации атмосферы.

Предосторожности, необходимые при обращении с телескопом

В башне находятся точные приборы, необходимые для выполнения хороших наблюдений, качество которых зависит от того, как мы обращаемся с этими приборами. Прежде всего нужно следить за чистотой объектива, поскольку свет звезд поглощается и рассеивается грязью. Поэтому следует как можно чаще промывать наружную поверхность объектива, обращенную к небу (линза из кроны), и даже внутреннюю поверхность, рас-

положенную в трубе (линза из флинта), если к ней имеется доступ. Очень чистый лоскут тонкого полотна хорошо подходит для этой цели; нужно протирать объектив до полного исчезновения пятен, по мере надобности смачивая тампон спиртом. Продукты сгорания тяжелых масел являются большим врагом стекла, так как плотно прилипают к нему и могут проникать в старые линзы из флинта. Нужно обрабатывать свой объектив по крайней мере каждые два месяца. Необходимо содержать

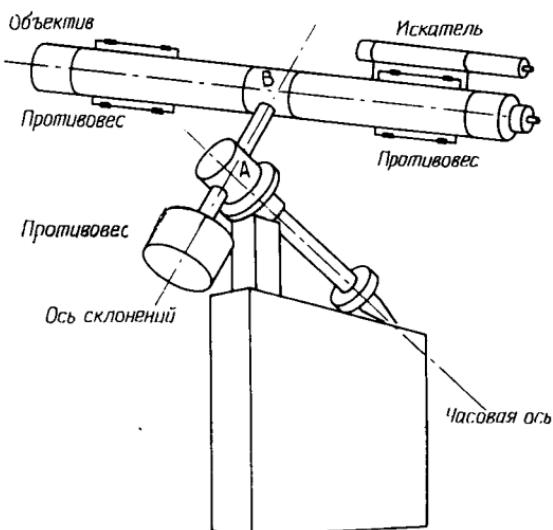


Рис. 4.2. Уравновешивание астрономического рефрактора. А — центр тяжести подвижных частей, В — центр тяжести всего рефрактора.

в чистоте и окуляры, но их линзы часто покрыты просветляющими слоями, поэтому их нельзя тереть, а можно только легонько обмахивать мягкой кисточкой.

Внутри трубы телескопа не должно происходить ни отражения, ни рассеяния света на пути к окуляру. Нужно убедиться в хорошем состоянии внутренней части трубы, освещая ее дневным светом неба. Одно время было принято помещать внутри трубы телескопа длинные рифленые трубы, при этом между ними и трубой оставлялся просвет, чтобы экранировать свет ламп, помещенных внутри трубы или около объектива. Лучше убрать эти трубы, которые только утяжеляют инструмент, оставив две диафрагмы, и вывести, если это возможно, источники света из трубы.

Многие инструменты, используемые для измерения двойных звезд,— это старые телескопы на немецкой монтировке, позво-

ляющей наблюдать всю небесную полусферу. Главные их части во избежание несчастных случаев должны быть тщательно уравновешены.

Уравновешивание выполняется в два приема. Сначала нужно убедиться, что центр тяжести трубы находится на верхнем конце

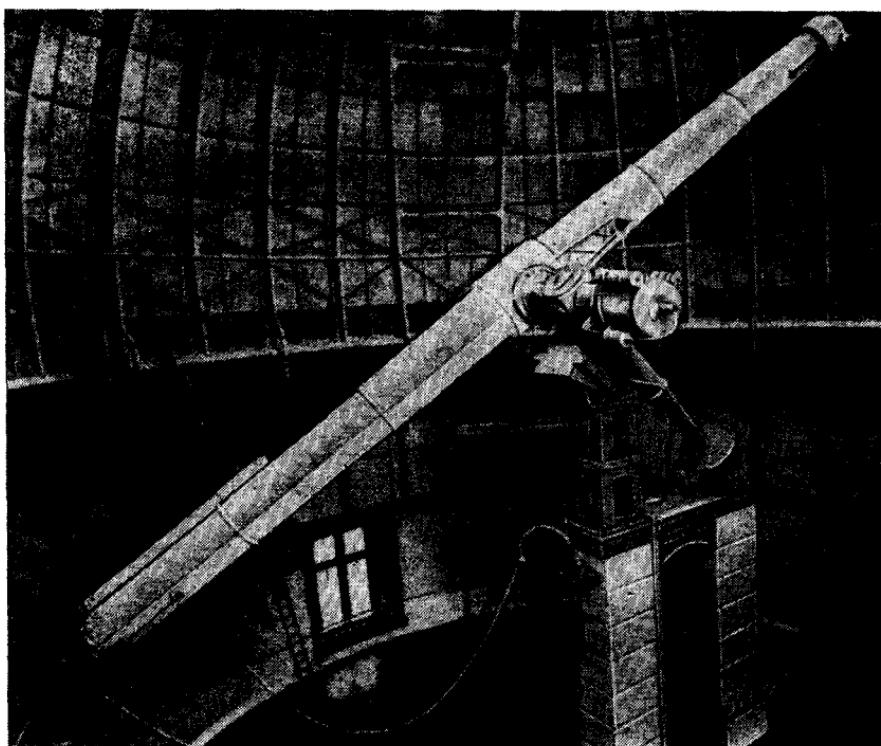


Рис. 4.3. Большой рефрактор обсерватории в Ницце. Объектив со свободным отверстием 74 см восстановлен в 1966 г. Тексеро. Фокусное расстояние 17,89 м. Разрешающая способность $0,16''$. Человек в нижнем левом углу рисунка дает представление о масштабе. (Фото обсерватории в Ницце.)

оси склонений. Это требует разумного распределения противовесов (рис. 4.2), контроль производится с помощью пружинного динамометра при различных положениях инструмента. Затем нужно убедиться, что центр тяжести всего подвижного комплекса находится на пересечении оси склонения и часовой оси. В качестве примера укажем, что вес подвижных частей большого рефрактора в Ницце составляет 7 тонн и он уравновешивается с точностью до 2—3 кг, при этом пневматические системы непрерывно осуществляют блокировку инструмента и обеспечи-

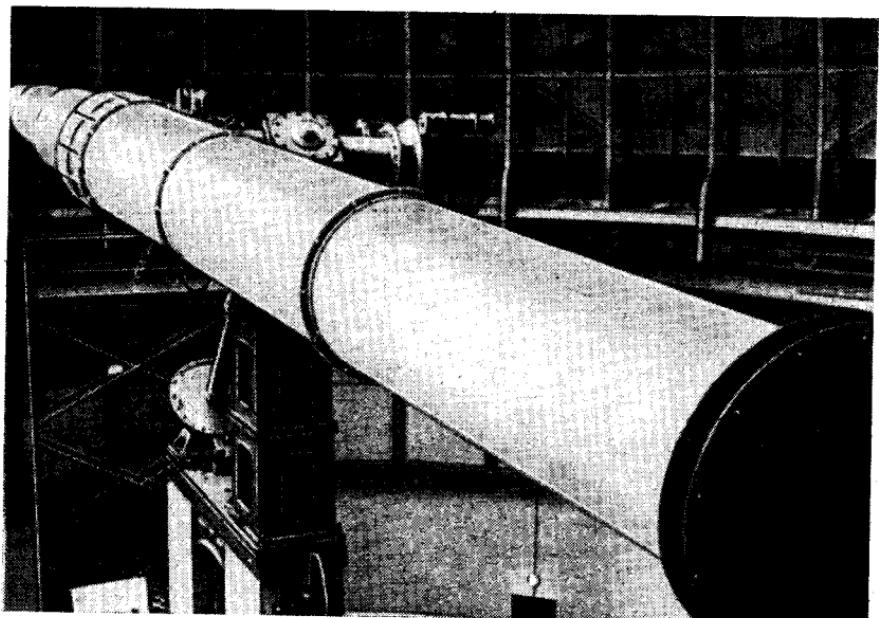


Рис. 4.4. Объектив 74 см большого рефрактора обсерватории в Ницце только что установлен на конце 18-метровой трубы. (Фото обсерватории в Ницце.)



Рис. 4.5. Монтаж объектива диаметром 74 см 29 мая 1969 г. Тексеро устанавливает линзы в оправу. (Фото обсерватории в Ницце.)

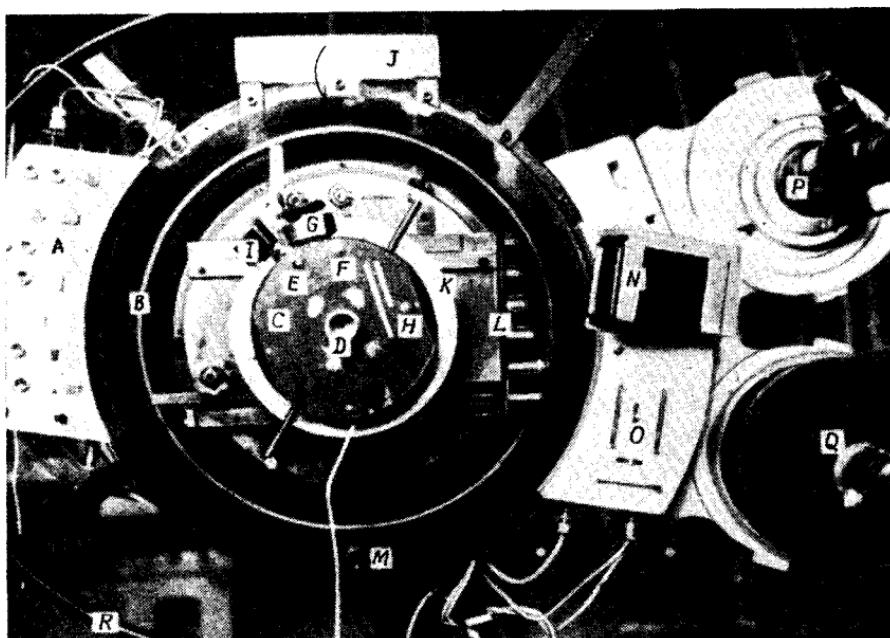


Рис. 4.6. Окулярная часть 74 см рефрактора. А — пульт купола с выключателями управления пневматических зажимов по α и δ , регулировкой освещения кругов и подсветки поля зрения. В — рукоятка установки фокуса. С — нитяной микрометр. Д — окуляр с фокусом 25 мм с кольцом фокусировки. Е — реостат освещения нитей микрометра. Ф — реостат подсветки позиционного круга и барабана микрометра. Г — барабан микрометрического винта. Н — осветитель позиционного круга и барабана. И — устройство для считывания отсчетов барабана. Ј — магнитофон. К — позиционный круг и устройство его регулировки. Л — сменные окуляры. М — микроскоп круга склонения. Н — индикатор отклонения нитей микрометра. О — ручки грубого движения по прямому восхождению и склонению. Р — искатель с объективом диаметром 25 см. Q — гид. R — страховочное кольцо. Движения зажимным винтом и команда на включение магнитофона могут осуществляться также с панели, невидимой на фотографии. (Фотография обсерватории в Ницце.)

вают полную безопасность работы. Старые инструменты, кроме того, имеют противовесы, чтобы облегчить перемещение инструмента. При установке какого-либо вспомогательного оборудования лучше всего заново уравновесить телескоп. Пренебрежение этим элементарным правилом — причина несчастных случаев, которые стоили человеческих жизней.

Телескопы конца прошлого века часто снабжены посеребренными разделенными кругами, проградуированными через каждую минуту дуги по склонению и через 20 секунд времени по прямому восхождению. Эти круги должны чиститься так же часто, как и объектив, покрывать лаком их не нужно. Показания

с них должны считываться с помощью указателя из нейлоновой нити, при этом следует избегать использования игл, которые отбрасывают нежелательные тени. Считывание показаний с этих кругов осуществляется с помощью отсчетных микроскопов или с помощью призм полного внутреннего отражения. Следует со-

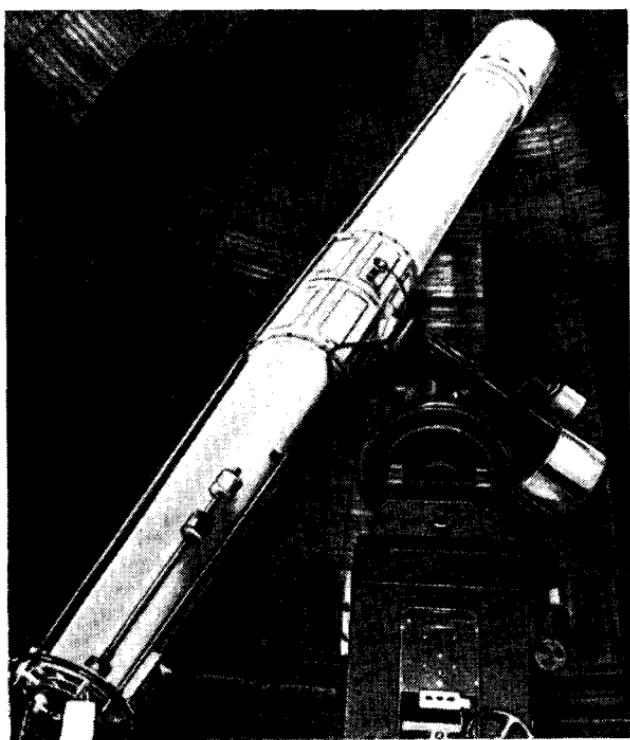


Рис. 4.7. Обсерватория в Ницце. Рефрактор с диаметром объектива 50 см, фокусное расстояние 7,50 м. Объектив Кудэ, изготовленный Тексеро, введен в эксплуатацию в 1967 г. (Фото обсерватории в Ницце.)

хранить эти старые приспособления, модифицировав только подсветку, они позволяют фиксировать положение светил с точностью до долей минуты по склонению и нескольких секунд времени по прямому восхождению, что весьма удобно. В самом деле, наблюдатель двойных звезд располагает полем зрения от 5 до 6', при этом слабые звезды в искатель не видны и можно рассчитывать только на основной инструмент для их отождествления. Даже если имеются электронные системы наведения, следует сохранить старые разделенные круги, которые надежны в любых условиях.

Атмосферная турбулентность

Прежде чем перейти к практическим вопросам, связанным с наблюдениями, целесообразно изучить главную причину искажения изображения — атмосферную турбулентность.

Световые лучи подвержены шести основным типам помех при прохождении через атмосферу Земли. Это преломление, поглощение, рассеяние, дисперсия, дрожание и размывание. Каждая из помех порой портит изображение до неузнаваемости и делает его непригодным для изучения. Преломление, поглощение и рас-

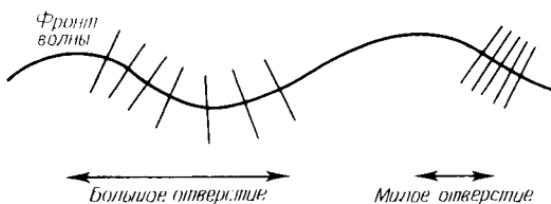


Рис. 4.8. Атмосферная турбулентность. Искривленный волновой фронт в случае малого объектива может рассматриваться как плоский, в случае же большого объектива следует учитывать искривление фронта. В первом случае наблюдается дрожание изображения, но само изображение четкое, во втором случае изображение размывается, но стабильно.

сияние света играют, вообще говоря, менее важную роль при наблюдениях с высоким угловым разрешением. Атмосферная дисперсия — это не что иное, как дифференциальное преломление, она приводит к тому, что звезды имеют вид маленьких спектров. Это явление заметно только на больших зенитных расстояниях, и у рефракторов оно менее выражено. Его можно уменьшить, поставив желтый светофильтр. Зато дрожание и размывание в большинстве случаев ответственны за порчу изображения. Дрожание вызвано прохождением перед объективом плоских волновых фронтов, наклон которых к лучу зрения меняется случайным образом из-за медленных изменений показателя преломления атмосферы. Размывание же изображения вызвано волновым фронтом, деформированным так, что его уже нельзя считать плоским. При наблюдениях с большими апертурами дрожания изображения незаметны, так как фронт волны, деформированный быстрыми вариациями показателя преломления атмосферы, никогда не будет плоским в пределах площади объектива. При малом диаметре объектива в некоторые ночи изображения четкие, но колеблются около среднего положения, тогда как в большой инструмент изображения звезд кажутся более стабильными, но превышают размеры дифракционного диска (рис. 4.8).

Именно явление, вызывающее в совокупности дрожание и размывание изображения, называется атмосферной турбулентностью. Математически ее определяют как среднее угловое отклонение истинной траектории светового луча от его теоретического направления. Это отклонение меняется случайным образом в пределах малого телесного угла, не более нескольких секунд дуги. Данжон определил характерный размер турбулентности, дав порядок величины этого угла в функции видимости изображения. Когда угловой размер турбулентности равен пределу разрешения, дифракционное изображение сильно искажено и дифракционные кольца не видны. Когда турбулентность значительно меньше предела разрешения, например не превосходит половины предельного угла разрешения, дифракционное изображение остается хорошо видимым и инструмент работает в полную силу. Например, для телескопа с объективом 50 см, у которого разрешающая способность составляет $0,24''$, критическим значением турбулентности, приводящим к заметному искажению изображения, будет $0,12''$. Поскольку турбулентность редко бывает меньше $0,1''$, все большие телескопы очень редко используются с теоретической разрешающей способностью.

Во время измерений важно записывать состояние качества изображения в начале ночи и в течение наблюдений. Вообще говоря, чтобы сделать полезные наблюдения, необходимо иметь изображение, у которого видны центральное пятно и дифракционные кольца. Как только турбулентность размывает дифракционный диск до неузнаваемости, проведение корректных наблюдений становится невозможным. Быстрое дрожание изображения, достаточно четкого, более предпочтительно по сравнению с его размыванием, поскольку глаз и мозг фильтруют процесс дрожания и запоминают информацию о структуре изображения пары в короткие интервалы более высокого качества изображения. Многие наблюдатели обычно оценивают качество изображения по пятибалльной шкале, в которой 0 баллов соответствует сильно размытым изображениям, а 5 баллов — четким дифракционным картинам. Впрочем, качество изображения ежеминутно меняется даже в течение очень хорошей ночи. Наилучшие изображения можно ожидать на заходе Солнца, когда режим ветров приближается к ночному бризу.

Наблюдения ближдающих теней дают точные сведения о направлении ветров, их скорости и тепловых вихрях в трубе телескопа. Для этого наводят телескоп на яркую звезду и, сняв окуляр, помещают глаз вблизи фокальной плоскости телескопа. При этом можно видеть, как поле объектива быстро пересекают волны света: яркие полосы сменяются темными. (Такая картина наблюдается на дне бассейна, поверхность которого покрыта рябью.) Эти волны вызваны слоями воздуха с различным пока-

зателем преломления (рис. 4.9). Вставив окуляр и выдвинув его на несколько миллиметров, можно видеть внефокальное изображение звезды. Его структура определяется слоями воздуха, расположеннымными на высоте несколько километров, при этом вид внефокального изображения звезды напоминает флаг, разевающийся на ветру. С помощью такой процедуры можно убе-

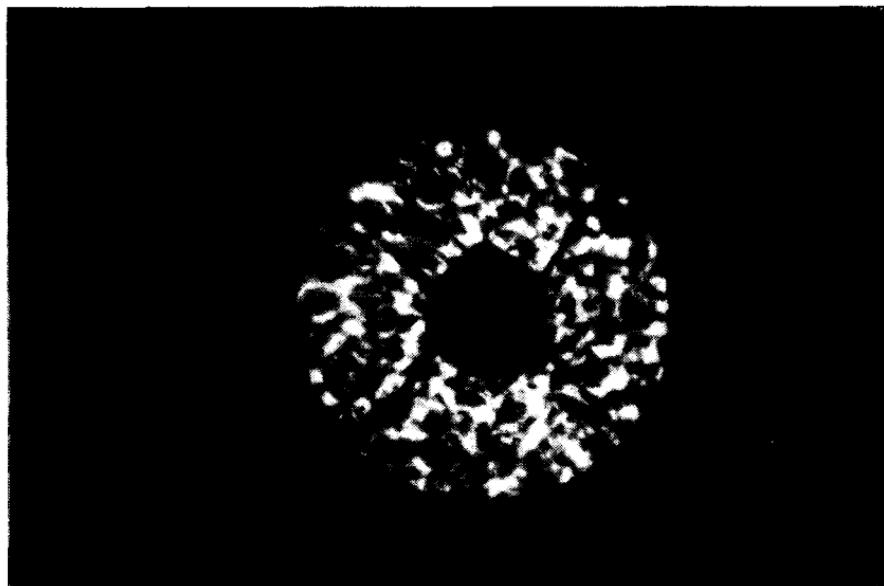


Рис. 4.9. Фотография блуждающих теней. Тени сфотографированы на рефлекторе с апертурой 152 см обсерватории От-Прованс Мартином и Борнино (Университет в Ницце). Экспозиция 1/1000 с, увеличение яркости в 80 000 раз, пленка Tri X. В отсутствие турбулентности поверхность зеркала выглядела бы равномерно освещенной. Видна тень от вторичного зеркала (система Кассегрена) и силуэты растяжек,держивающих вторичное зеркало.

диться в наличии высотных ветров. Если они дуют очень высоко, то мало надежды на улучшение изображения в течение ночи.

Следует различать турбулентность инструментального происхождения и атмосферную турбулентность. Первая приводит к медленным колебаниям изображения, которые можно устранить, например, открыв окна, другая приводит к устойчивому размытию изображения, тем более значительному, чем дальше источник возмущений.

Если изображение заметно отличается от дифракционного кружка, наблюдатель испытывает трудности с проведением из-

мерений. Биссектирование изображения нитью микрометра становится трудным, параллельность нитей также проверяется с трудом. Микрометры двойного изображения и интерферометры менее чувствительны к качеству изображения. Прекрасные ночи очень редки, и астроному при измерениях очень мешает атмосферная турбулентность, влияние которой сводится в основном к дрожанию и размыванию изображения. Отсюда следует, что качество изображения редко благоприятствует наблюдению двойных звезд. Астроном должен быть начеку и ожидать благоприятных часов. Время, проведенное в башне телескопа,— это чаще всего часы ожидания. Астроном, который старается во что бы то ни стало использовать даже посредственные изображения, рискует сделать бесполезные, непригодные для обработки наблюдения, а в случае поиска новых пар ему никогда не удастся открыть наиболее трудно обнаружимые пары, представляющие наибольший интерес.

Практические советы визуальному наблюдателю двойных звезд

Первое, что нужно сделать перед наблюдениями, это убедиться в правильных показаниях астрономических часов. В настоящее время звездное время дается электронными часами, которым нельзя слепо доверять, поскольку они часто портятся, останавливаются и показывают иногда фантастическое время. Следует тщательно позаботиться о сохранении старых маятниковых часов, которые не выходят из строя никогда, даже после наиболее сильных гроз.

Очень разумно и целесообразно отрегулировать маятниковые часы так, чтобы они показывали звездное время в соответствии с моментом равноденствия, относительно которого даны координаты звезд. Например, если координаты даны для эпохи 1950 г., следует поставить часы на время, соответствующее эпохе 1950 г., в этом случае поправка часов будет близка к нулю в течение ночи.

Во время наблюдений весь свет в башне должен быть выключен. Напомним, что для полной адаптации к темноте глазу требуется 40 мин. Нужно заранее выписать на листе бумаги или в тетради координаты звезд, которые вы собираетесь наблюдать. В случае необходимости этот список следует освещать маленькой неоновой лампочкой от ночника. Обычные карманные фонарики светят слишком ярко, и их использование на обсерватории должно быть запрещено. Астроном во время наблюдений должен довольствоваться светом, который падает с неба. Это хороший способ подготовить зрение к предстоящей работе.

Наблюдения звезд не опасны для зрения, но все-таки разумно принять меры предосторожности при наблюдении ярких светил. В самом деле, световая энергия, перехваченная объективом, проходит полностью в выходной зрачок, диаметр которого тем меньше, чем больше увеличение. Отсюда следует, что на малый участок роговой оболочки глаза падает весь поток света, проходящий в объектив телескопа. Этот поток больше собираемого невооруженным глазом в $C (G/G_e)^2$ раз. Именно во столько раз усиливается освещенность данной точки роговой оболочки, причем для больших инструментов это усиление может достигать пяти миллионов раз. Правда, не весь поток попадает на сетчатку глаза и часть его распределяется по всей поверхности роговой оболочки. Когда мы наблюдаем Луну или планету, у нас не создается впечатления, что свет ослепляет, хотя на деле роговая оболочка подвергается своего рода «световой атаке», которая при длительном действии может утомить глаз. Наконец, очень тонкий пучок света, попадающий в глаз, чувствителен к дефектам окуляра, но это не мешает опытному наблюдателю.

Наблюдения двойных звезд требуют долгой и нудной тренировки, вот почему молодежь избегает этой области астрономии. Основное различие между фотографическими и визуальными наблюдениями состоит в том, что в первом случае работает инструмент, а во втором — астроном. Это последнее обстоятельство помогает приобрести навык, но нужно 9—10 лет практики, прежде чем наблюдатель двойных звезд достигнет успеха и будет признан. Чтобы привыкнуть к новому объективу, наблюдателю требуется год. Именно такое время потребовалось автору этих строк, чтобы научиться хорошо наблюдать на рефракторе апертурой 50 см в Ницце после того, как он пришел на смену 38-сантиметровому рефрактору. Еще больше времени затратил автор на то, чтобы привыкнуть к 76-сантиметровому рефрактору. Нет двух абсолютно одинаковых объективов. Действительно, вторичный спектр, ахроматизация, фокусное расстояние, напряжения в стекле никогда не бывают одинаковыми, так же как и реакция на атмосферную турбулентность, обусловленную ландшафтом местности и особенностями башни и объектива телескопа. Первые наблюдения с новым телескопом или со старым телескопом после долгого перерыва всегда малонадежны, так как глаз сначала должен привыкнуть к условиям и особенностям данного инструмента. Вот почему наблюдатели двойных звезд столь малоочисленны. Ведь их настойчивость всегда подвергается разнообразным испытаниям. Данжон сказал о наблюдателях двойных звезд, что они имеют особый дар.

Без преувеличения можно сказать, что нужны некоторые прирожденные способности, талант, чтобы стать хорошим наблюдателем. Во время наблюдений нужно расслабиться, не при-

216

Kor fudi 2 zetbra 1975: 1975, 752

Années premières
moins bonnes milles
de la nuit.**COU 1161**

8.5.85

-30

15.2

17.2

22.8

18.1

16.3

18:

19.28.6 + 28.10

(014)

8me

très douceur

8.7 - 8.7

4

outenant.

COU 1324

9.8-10.2

-1.20

36.0

38.0

41.4

43.7

43.2

20.2.3

3-Q

40.66

220.5

20.26.5 + 31.08

(0288)

9.4-9.6

8me

4

+ 014

COU 1318

9.3-9.3

-55

89.6

87.1

89.5

88.6

89.0:

20.04.3 + 31.39

9.1-9.1

dut bin double

difficile

4

8me

Examen AGK.2

21.21.7

AGK2 + 31.2019

4+

31.2020

29.2321

29.2322

30.2121

31.2021

31.2022

19.2323

30.2122

19.2324

29.2325

AGK2 + 31.2023

4+

31.2024

30.2123

30.2124

31.2025

31.2026

31.2027

29.2326

29.2327

30.2125

30.2126

8590K

179K



d(c. duree)

AGK2 + 30.2125(10.8) = COU 1337

20.23.6 + 30.12

 26.0
 23.4 3-Q 2050
 25.8 25.0
 24.6

 797195 992
 817162 999
 818181 999
 186256

 10.0-10.0
 00.11.5
 350 11.7

m. t. + A. B. B. o. n.

лагать особых усилий и не напрягать мышцы. Закрывать один глаз во время наблюдений вовсе необязательно, поскольку находящийся перед ним корпус микрометра является естественным экраном. Голову лучше отклонять назад и шею не напрягать, длинная шея не дает никаких преимуществ. Лучше наблюдать стоя, несколько согнув ноги, чтобы голова была на нужной высоте. Наблюдать сидя не рекомендуется, поскольку при этом теряется время на лишние операции. Хитроумные кресла, предназначенные для наблюдателей, которые можно иногда видеть в башнях телескопов, следует сдать в музей. Хороший наблюдатель должен чувствовать себя удобно во всех положениях, что приобретается с трудом и очень медленно. Начинающие наблюдатели испытывают физические страдания от подобных упражнений. Помощь ассистента излишняя, если астроном умеет хорошо организовать работу; он диктует наблюдения на магнитную ленту или, как в Вашингтоне или в Ницце, регистрирует их автоматически с помощью самописца. Он избежит при этом сюрпризов, которые может приподнести секретарь, заснувший без предупреждения.

Наблюдения к югу от зенита проводятся при положении трубы телескопа к западу от опорной колонны, с тем чтобы видеть светила перед их прохождением через меридиан. Это предпочтительнее для качества изображения. При наблюдениях около полярной области лучше, чтобы труба находилась к востоку от колонны, так что астроном и инструмент возвратятся к прежнему расположению. Старые рефракторы смонтированы так,



Рис. 4.10. Страница журнала наблюдений на рефракторе 50 см. Приведены измерения трех двойных звезд, открытых Куто. Приведены их предварительные обозначения (COU 1 161), звездные величины в момент открытия ($8,5, 8,5''$), в середине строки указаны экваториальные координаты. Под звездной величиной указано разделение компонентов вдоль меридиана или часовой угол в часах и минутах. Приведена серия из четырех или пяти измерений позиционного угла, затем его среднее значение и отождествление квадранта. Поскольку пары очень тесные, разделения оценены в пределах от 0,14 до $0,28''$. В конце строки даны другие указания: использованный окуляр (здесь используется окуляр с фокусным расстоянием 8 мм, что соответствует увеличению в 938 раз), оцененные звездные величины компонентов, оценка качества изображения от 4 до 4,5 балла, т. е. очень хорошее качество изображения по пятибалльной шкале. Кроме того, имеется несколько кратких заметок.

Внизу приведены результаты проверки на двойственность звезд каталога AGK2. Среди 22 проверенных звезд во втором столбце отмечена одна новая двойная звезда. В правильности отождествления можно убедиться, проверяя положение соседней звезды.

Записи наблюдений этой ночи 2 октября 1975 г. занимают 11 страниц журнала и включают 32 измерения пар, проверку на двойственность 407 звезд и открытие среди них 9 новых пар.

чтобы можно было наблюдать при положении трубы к востоку от колонны, поэтому многие наблюдатели сохранили эту привычку, но при таком положении звезды можно наблюдать только после прохождения через меридиан.

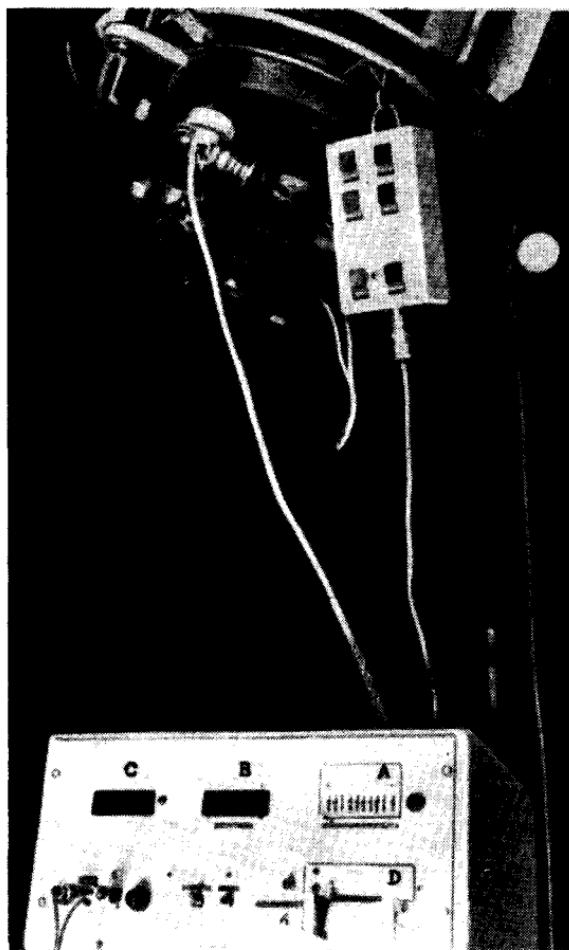


Рис. 4.11. Обсерватория в Ницце. Рефрактор 50 см. Регистрация наблюдений. А — отождествление объекта, В — установка позиционных углов, С — установка угловых разделений, Д — печать. (Фотография обсерватории в Ницце.)

Во время наблюдений нужно действовать быстро, но без резких движений. Звезда должна оставаться неподвижной в поле зрения, в противном случае из-за физиологических эффектов

зрения она будет выглядеть деформированной; она должна быть вблизи центра поля зрения. Наблюдать нужно всегда одним и тем же глазом, быстро вглядываться в изображение, адаптироваться к виду одиночных звезд, к перемещениям пятен света. Не следует долго колебаться при биссектировании изображения или при оценке параллельности, при этом прямая, соединяющая зрачки глаз, должна быть параллельна или перпендикулярна линии, соединяющей компоненты пары. Рекомендуется делать пять наведений по позиционному углу и четыре двойных наведения для измерения расстояния между компонентами. Нужно работать при оптимальном увеличении в зависимости от условий, часто весьма переменных, а также от характеристик наблюдаемого объекта. Поэтому следует достаточно часто менять окуляры, примерно так, как водитель переключает скорость в зависимости от условий на трассе. Часто предпочтительно измерять позиционный угол и разделение компонентов при различных увеличениях. Чтобы навести на центр изображения, нужно хорошо видеть дифракционное пятно, а для этого требуется повышенное увеличение, в то время как параллельность между нитями и прямой, соединяющей центры компонентов, проверяется при меньших увеличениях и более мелких изображениях. Продолжительность наблюдения двойной звезды не должна превышать 5 мин. С учетом перерывов, требуемых для перехода к другой звезде, хороший темп наблюдений составляет восемь измерений в час.

Чем больше входное отверстие телескопа, тем сильнее чувствителен он к атмосферной турбулентности. Опыт работы автора на рефракторах с апертурами от 38 до 102 см позволяет сделать несколько сравнений. Если качество изображения великолепно при наблюдениях с объективом в 38 см, то оно будет великолепным и при наблюдении с объективом 50 см и очень хорошим с объективом 76 см. Мы заметили, что атмосферные условия устанавливают одно и то же увеличение, каково бы ни было входное отверстие телескопа. Например, если с рефрактором 38 см атмосферные условия не позволяют применить увеличение большее, чем в 900 раз, то не удастся использовать это увеличение и на 76-сантиметровом рефракторе, хотя достигнуть этого увеличения можно. В этих условиях большой объектив не позволит наблюдать пары, слишком тесные для малого объектива. Если условия более посредственные, то опыт показывает, что потеря эффективности большого телескопа становится очень значительной. Двойные звезды с большой разностью блеска компонентов не будут более наблюдаемы, тогда как с меньшим отверстием их еще удастся наблюдать.

На пределе возможности инструмента глаз испытывает трудности не только при измерениях, но и при оценках пары. Напри-

мер, для трудной пары часто невозможно судить о разделении компонентов и об их относительном блеске. Некоторые позиционные углы более трудны для измерений по сравнению с другими. Например, при измерении углов 130 или 310° голова наблюдателя будет находиться в очень неудобном положении.

Наблюдения, продиктованные на магнитную ленту или записанные на самописец, на следующее утро должны быть переписаны в журнал наблюдений. Проявляйте решительность при переписывании своих наблюдений. Снабдите их комментариями, указав, что усложняет измерения, или описав вид какой-либо необычной пары.

Наконец, несколько советов тем, кто отправляется на экскурсию в башню телескопа. Не забывайте, что астроном, который наблюдает визуально при прекрасных качествах изображения, подобен хищному зверю, пожирающему свою жертву. Не беспокойте его ни по какому поводу, позвольте ему развернуться во всю свою мощь.

Наблюдения искусственных небесных объектов

В планетариях и некоторых астрономических лабораториях сконструированы оптические установки, которые имитируют некоторые двойные или кратные системы, звезды, планеты, туманности и звездные скопления. Эти искусственные светила наблюдаются в условиях, максимально приближенных к реальным, с моделями телескопов. В случае когда поворачивается искусственный небесный свод, воспроизводя видимое движение светил, мы имеем дело с планетарием.

Эти установки позволяют показать посетителям небо в любой момент времени. Разумеется, искусственные условия несравнимы с реальными наблюдениями небесных объектов, поскольку при этом нельзя точно воспроизвести атмосферную турбулентность и бесконечное разнообразие небесных тел с их цветами, но таким образом можно создать иллюзию наблюдения, ознакомиться с методами наблюдений, попробовать измерять.

Любитель, который располагает рефрактором или небольшим рефлектором, с пользой для дела может изготовить искусственные двойные звезды, чтобы убедиться в качестве своего инструмента. Нет ничего легче, чем изготовить искусственную звезду, при этом достигается полная иллюзия. Достаточно рассматривать изображение маленькой лампы или изображение Солнца, отраженное полированным стальным шариком, расположенным достаточно далеко, так, чтобы видимый диаметр изображения был пренебрежимо мал. При объективе диаметром 10 см можно взять шарик диаметром 4 мм, поместить его в сотне метров и рассматривать днем отраженное изображение Солнца или лучше

ночью отражение от лампочки карманного фонарика, расположенной в нескольких дециметрах перед шариком. Таким образом можно иметь изображение одиночной звезды, не искаженное атмосферной турбулентностью, которое можно рассматривать в комфортабельных условиях, не выкручивая при этом шею.

Две лампы, поставленные по сторонам от шарика, создадут прекрасную имитацию двойной звезды после того, как их свет отразится от шарика. Можно менять по желанию разделение компонентов до предела разрешения и даже создавать различие в блеске компонентов, ставя лампы на разных расстояниях.

Я часто применял такой метод, чтобы изучить качество небольших рефракторов, приобретенных любителями. Если мы обозначим через R радиус шарика, через L расстояние между лампами, через h их расстояние от шарика и через D расстояние объектива от шарика, то разделение компонентов искусственной пары в секундах дуги запишется следующим образом:

$$s = 10^5 RL / (hD).$$

С шариком радиуса 4 мм и лампочками, расположенными на расстоянии 10 см одна от другой и на расстоянии 1 м от шарика, наблюдающегося с расстояния 100 м, получаем разделение, 0,2''. Эта установка позволяет имитировать многие известные звездные пары и дает возможность устраивать для своих друзей сеансы наблюдений даже в пасмурную погоду.

Впрочем, и в городе, и в деревне искусственных звезд полно и днем. Любая неровность, отражающая солнечный свет, может служить искусственной звездой. Изоляторы на электрических и телеграфных столбах, витрины, черепки керамики, частицы слюды на стенах из гранита и т. п. дают множество звездообразных изображений.

Старые ветряные мельницы — вехи на горизонте в наших деревнях, могут служить искусственными планетами. Если вам повезло и вы имеете протяженный открытый горизонт, не пренебрегайте некоторыми из них, расположенными в 20—30 км от вас, их видимые угловые размеры соответствуют размерам больших планет. В лучах Солнца их круглые стены дают возможность наблюдать терминатор, а пятна и трещины великолепно имитируют детали на поверхностях планет. Преимущество здесь состоит в том, что можно удобно расположиться и сфотографировать объект в условиях освещения, таких же, как и при реальных наблюдениях. Можно сравнить затем фотографии или рисунки, сделанные с телескопом, с реальной картиной, воспроизведя таким образом работу космических зондов, которые запускаются, чтобы изучить на месте то, что мы фотографируем с помощью наземных телескопов. Это хорошее средство для того, чтобы привыкнуть к своему телескопу, я его часто ис-

пользовал в Пюибейяре (департамент Вандея), где, находясь в моей маленькой обсерватории, я царил над всей рощей. Заинтригованные крестьяне смотрели на меня с недоверием, когда я появлялся на вершине и рассматривал их старые мельницы, проявляя особый интерес к тем пятнам и неровностям, которые были похожи на море или высокую гору.

КРАТКАЯ БИБЛИОГРАФИЯ

1. *Barocas V.* Atmospheric seeing, J. Brit. Astron. Ass. G. B., LXXXII, No. 4, 279, 1972
2. *Couteau P.* L'Osservazione Astronomica ad alta risoluzione, Publ. Istituto Nazionale Di Ottica, IV, No. 655, 883, 1972.
3. Кожевников Н. И. Дневные условия видимости вблизи поверхности почвы. Солнечные данные. № 12, 104, 1971.
4. *Martin F., Borgnino J., Roddier F.* Localisation des couches turbulentes atmosphériques par traitement optique de clichés d'ombres volantes, Nouv. Revue d'Optique, VI, No. 1, 15, 1975.
5. *Vernin J., Roddier F.* Détection au sol de la turbulence atmosphérique par intercorrélation spatio-angulaire de la scintillation stellaire, Compt. Rend. 1975.
6. *Westheimer G.* Image quality in the human eye, Optica Acta, XVII, No. 9, 641, 1970.
7. Symposium No 19 UAI, Le Choix des sites d'Observatoires astronomiques, Bull. Astron., XXIV, fasc. 2, 85, 1963.
8. *Roddier Cl.* Étude des effets de la turbulence atmosphérique sur la formation des images astronomique, Thèse, 1976, Université de Nice.

Глава 5

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЗВЕЗД

Трудности отождествления звезд

Очень важно не только хорошо измерять наблюдаемые объекты, но и уметь находить их в каталогах. Координаты двойных звезд обычно даны с точностью 1' по склонению и 0,1^п по прямому восхождению. Этой точности, как правило, достаточно; наблюдатель обычно доверяет координатам, которые имеются в его наблюдательной программе. При этом предполагается, что наблюдатель, открывший двойную звезду, сделал надежное отождествление. Иногда искомая пара не наблюдается десятки лет с момента ее открытия. В этих случаях нередко случается, что не удается найти нужный объект. Более того, малейшие ошибки в координатах могут привести к путанице звезд и завершиться набором бесполезных наблюдений.

Наблюдатель двойных звезд слишком часто пассивен. Ему следовало бы убеждаться в правильности отождествления всякий раз, когда он в этом сомневается, т. е. когда он не может отыскать звезду в указанном месте или же когда он видит много пар в поле зрения своего инструмента либо в окрестности этого поля зрения.

Все исследователи — те, кто проводит наблюдения, и даже те, кто знаком со звездами лишь по их названиям, — должны иметь понятие о том, что лежит в основе звездных каталогов. Ярчайшие звезды, которых насчитывается около 3000, приводятся в многочисленных каталогах. Наиболее важных каталогов по крайней мере семь, причем звезды в них имеют различные обозначения, не считая их собственного названия или обозначения по созвездию, в котором они находятся. Более 200 000 звезд представлены в пяти каталогах. Каждая звезда имеет, следовательно, много обозначений. Каждый астроном должен уметь определять по этим обозначениям координаты и взаимное положение звезд. Как мы увидим ниже, задача усложняется при переходе к звездам все более слабого блеска.

Наблюдатель двойных звезд наиболее тесно соприкасается с проблемами отождествления, поскольку вынужден измерять свою звезду с большим увеличением, но при этом располагает малым полем зрения, в котором должна быть та единственная затеряв-

шаяся в ночи звезда, которую он ищет. Если вид двойной звезды сходен с тем, что он ожидает, он выполняет измерения, но если звезда одиночная или изменилась до неузнаваемости вследствие орбитального движения компонентов, нужно удостовериться в правильности отождествления. Это первостепенная задача, когда наблюдатель ищет новые пары; он должен знать заранее, какую звезду он собирается наблюдать, и должен быть достаточно уверен в себе, чтобы исправить возможные ошибки каталога.

История каталогов продолжительна, и мы не будем ее подробно описывать. Каждое поколение, начиная с Кеплера, старалось лучше изучить положения звезд и составляло каталоги, все более и более полные и точные. Эти труды в настоящее время зачастую имеют лишь исторический интерес.

Можно разделить каталоги на четыре основные группы: фундаментальные, промежуточные, общие и специальные.

Фундаментальные каталоги

Цель этих каталогов — дать абсолютные положения определенного числа звезд, именуемых фундаментальными, которые разумно распределены по небесной сфере. Они служат реперами для того, чтобы установить положение фундаментальных плоскостей: экватора и эклиптики. В свою очередь фундаментальные плоскости служат для определения положений других звезд.

Первый фундаментальный каталог — это каталог Ауэрса (1879), опубликованный Астрономическим обществом Германии (*Astronomische Gesellschaft*, или сокращенно AG). Он сокращенно обозначается буквами FC и содержит 539 северных звезд.

Второй NFK и третий FK3 фундаментальные каталоги были опубликованы Петерсоном в 1907 г. и Конффом в 1938 г. Число звезд в них достигает 1535, включая все звезды каталога AG.

Наконец, в 1963 г. был опубликован четвертый фундаментальный каталог FK4. Он представляет собой ревизию каталога FK3, выполненную Фрике и Конффом, которые дают положения звезд с точностью до $0,001^{\circ}$ и $0,01''$.

Промежуточные каталоги

Как и фундаментальные каталоги, они содержат ограниченное, но гораздо большее число звезд. Точность задания положения звезд в них меньше; в самых последних каталогах число звезд достигает 300 000.

До 1920 г. промежуточные каталоги создавались с помощью наблюдений на меридианном круге. Только начиная с 1928 г. для этой цели стали систематически использоваться астрографы.

Самые старые звездные каталоги, которые применяются при вычислении современных положений звезд, это каталоги Галлея, Флемстида, Лакайля и Брадлея, изданные в 1679, 1691, 1763 и 1817 гг. Многие двойные звезды каталога Бернхема отождествлены с этими старыми каталогами.

Следует особо упомянуть каталог Лаланда, который используется даже в наши дни, поскольку он всегда служит как источник для обозначения некоторых звезд с большим параллаксом и нелинейной траекторией на небесной сфере. Наблюдения Лаланда выполнены с 1789 по 1799 г. на рефракторе с диаметром объектива 7 см обсерватории Военной школы в Париже. События великой французской революции не помешали Лаланду измерить за 11 лет положения 47 390 звезд. Как это ни парадоксально, но не французская обсерватория, а британское научное учреждение отредактировало и опубликовало эти наблюдения в 1847 г. В этом труде даны положения звезд для равноденствия 1800 г. с точностью 0,01^s и 0,1''. Каталог Лаланда значительно опередил свое время как по числу звезд, так и по точности.

Другие каталоги, замечательные для своего времени, были изданы в первой половине XIX в., в частности каталоги Пиацци и Бесселя. По ним определялись собственные движения многих звезд с конца прошлого века. Упомянем также важный каталог Грумбриджа, изданный в 1838 г., который используется и в наши дни. Этот каталог, содержащий 4243 околосолнечные звезды, составлен в Лондоне на частной обсерватории.

Начиная с 1865 г. все более ощущается потребность в знании положений сотен тысяч звезд с высокой точностью для работ, связанных с поисками малых планет и комет и быстрым определением их орбит. Германское астрономическое общество, уже упоминавшееся выше, организовало в Германии, России, Англии, Северной Америке, Франции, затем в Индии, Австралии и Южной Африке цепь из 20 обсерваторий для наблюдений на небе зон размером в среднем пять квадратных градусов. В итоге было издано 20 каталогов, вышедших один за другим начиная с 1870 г. Эти каталоги вместе составляют каталог AGK1. Детальное описание их можно найти в *Traité d'astronomie stellaire* (André, 1899). Звезды каталога AGK 1 обозначаются индексом AG, за которым следуют название обсерватории, наблюдавшей соответствующую зону на небе, и номер светила по каталогу. Например: AG Bonn 9419, AG Leipzig 742 . . . Число звезд в AGK1 составляет около 200 000, они распределены по всему небу. Точность этого каталога такая же, как и каталога Лаланда.

Наблюдатели двойных звезд начала XX в., особенно Эйткен и Хасси, отождествляли вновь открытые звезды с помощью каталогов Лаланда и AGK1.

Но звездные каталоги должны регулярно подвергаться ре-визии, поскольку положения звезд меняются из-за их собствен-ного движения и движения фундаментальных плоскостей. Когда эти движения будут хорошо изучены, достаточно будет просто экстраполировать приведенные в каталогах положения звезд, но пока такая экстраполяция невозможна, поскольку требования к точности координат звезд растут, а методы наблюдений непре-рывно совершенствуются.

С 1930 г. звезды AGK1 вновь наблюдались на астрографе в Бергедорфе (Гамбург) с целью переиздания этого каталога, по-зволяющего определять собственные движения всех наблюда-емых звезд.

Тем временем в 1937 г. вышел в свет *General Catalogue of 33 342 stars for the epoch 1950* (Общий каталог 33 342 звезд для эпохи 1950), изданный Боссом, общепринятое сокращенное обозначение которого GC. Этот труд содержит все звезды, положе-ние которых было точно измерено с помощью меридианых кругов. Несмотря на свое название, он не является общим ка-талогом. Его достоинство в том, что он позволил выполнить массовые измерения собственных движений звезд, необходимые для разработки современной звездной динамики.

Необходимость сведений о собственных движениях большого числа звезд побудила Шлезингера и Барни на Йельской обсерва-тории в США вновь пронаблюдать звезды AGK1 начиная с 1928 г. на широкоугольном астрографе. Йельский каталог, опублико-ванный с 1939 по 1959 г., содержит 137 668 звезд. В нем приве-дены визуальные и фотографические звездные величины, а также спектральные классы и собственные движения. Однако его точ-ность не достигает точности каталога GC.

В 1954 г. был издан новый каталог, озаглавленный *Zweiter Katalog der Astronomische Gesellschaft für das Aquinoktium 1950*. Этот каталог обозначается AGK2. Это однородное издание, а не последовательность выпусков, немного не связанных между со-бой, как предыдущий каталог. Он содержит 183 312 звезд и ох-ватывает область неба от склонения — $2,5^{\circ}$ до Северного полюса, т. е. лишь часть неба, наиболее доступную астрографу в Гам-бурге. Положения звезд имеют прежнюю точность, но звездные величины в нем фотографические. Важное достоинство этого каталога состоит в том, что в нем для каждой звезды даны ссылки на каталог Аргеландера, который мы опишем ниже.

Для определения собственных движений предполагалось пе-реснимать фотографии AGK2 начиная с 1958 г., чтобы завершить каталог AGK3. Этот каталог еще не опубликован, но существует в виде записей на магнитных лентах. Звезды в каталогах AGK2 и AGK3 имеют одинаковые обозначения. Каталог AGK3 более точный, положения звезд в нем даны с точностью $0,001^{\circ}$ и $0,01''$.

В нем также приведены годичные собственные движения с четырьмя десятичными знаками, спектральные классы, фотографические звездные величины и ссылки на каталог Аргеландера. Каталог AGK3 является основным источником данных для астрометристов, наиболее надежным и полным из всех существующих.

Каталоги AGK3 и Йельский охватывают лишь часть неба, что недостаточно для изучения орбит искусственных спутников Земли. Поэтому возникла необходимость составления каталога для этой цели, который покрывает все небо. Этот труд взяла на себя Смитсонианская астрофизическая обсерватория, которая в 1966 г. опубликовала каталог, названный *SAO Star Catalog*. Четыре выпуска этого каталога содержат положения, собственные движения и спектральные классы 258 997 звезд всего неба со ссылками на Йельский каталог и каталог Аргеландера. Он является, таким образом, комбинацией каталогов AGK3 Йельского и FK4. Он также может использоваться в форме записей на магнитных лентах. Этот каталог менее полный, чем AGK2 и AGK3, особенно в полосе Млечного Пути, но он покрывает все небо. Он ценен для вычисления моментов лунных покрытий и для поиска новых двойных звезд.

Общие каталоги

Общим каталогом называется исчерпывающий список объектов до некоторой заданной звездной величины. Существуют два общих звездных каталога: каталог Аргеландера и каталог, составленный на основе *Carte du Ciel*.

Каталог Аргеландера. Этот каталог является основным для наблюдателя двойных звезд. Он датируется 1850 г. Звезды в нем обозначаются символом BD (*Bonner Durchmusterung*) или DM. Всего каталог содержит 457 847 звезд от северного полюса до склонения — 23° .

Аргеландер принял новое, очень удобное представление каталога: его каталог разделен на зоны по 1° по склонению, в каждой зоне звезды располагаются в порядке увеличения прямого восхождения, т. е. номер звезды записывается, например, так: BD + 31°2152 (9,0), в скобках указывается звездная величина. Поскольку в каждой зоне содержится почти пять тысяч звезд, за исключением околосеверных областей, такое представление приблизительно указывает место звезды на небе. Подобным же образом составлен каталог AGK2.

Аргеландер выполнил свои наблюдения в Бонне на маленьком рефракторе диаметром 72 мм за удивительно короткое время — всего за 10 лет. Он задался главной целью — произвести перепись всех звезд до 9-й звездной величины, а также некоторых звезд в интервале от 9-й до 10-й звездной величины. Около по-

ловины звезд каталога принадлежит этой последней категории; впоследствие оказалось, что многие из них в действительности имеют звездные величины 10 и даже 11^m . Положения звезд для эпохи равноденствия 1855 г. даны с точностью до $0,1^s$ и $0,1'$, так что это издание, к сожалению, недостаточно точное для вычисления орбит движущихся светил. Тем не менее он включает все интересные объекты и представляет собой замечательный документ, удобный в обращении и использующийся на многих обсерваториях.

Перепись звезд была продолжена позднее до Южного полюса Зонфельдом, учеником Аргеландера, затем фотографическим методом на Капской обсерватории (*Cape Photographic Durchmusterung*).

Невысокая точность положений звезд в каталоге Аргеландера и возрастающие потребности астрономии поставили к 1900 г. перед необходимостью создания нового общего каталога, значительно более обширного. Именно эту задачу взяла на себя Парижская обсерватория, которая подготовила *Carte du Ciel* (карту неба). Но каталог *Carte du Ciel* труден для использования и не пригоден для непосредственного употребления визуальным наблюдателем, так как число звезд в нем превосходит 10 миллионов и даны только их прямоугольные координаты. Поэтому наблюдатель всегда пользуется каталогом Аргеландера (BD), чтобы отождествить звезды ночью и не заблудиться на небе. Теперь кратко опишем методы отождествления.

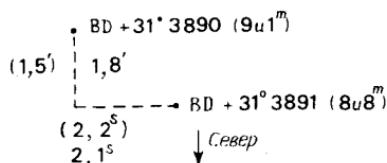
Метод отождествления звезд по каталогу BD. Ничто так не походит на звезду $9,5^m$, как другая звезда $9,5^m$. Таких звезд сотни тысяч. Как же астроном отождествляет их, наблюдая на большом инструменте?

Перед наблюдениями необходимо знать прецессию, которую обычно вычисляют для самой яркой звезды. Прецессия по прямому восхождению практически постоянна, а по склонению уменьшается до нуля для $\alpha = 6^h$ и 18^h и максимальна и имеет противоположный знак для $\alpha = 0^h$ и 12^h . Более того, достаточно далеко от полюсов прецессия по прямому восхождению составляет 3^s в год, ее максимальное значение по склонению составляет $8'$ за 25 лет. Зная хорошо прецессию, можно наводить телескоп на объекты, не производя сложных расчетов, связанных с поправкой на эпоху равноденствия.

Поскольку каталог BD содержит все звезды ярче $9,5^m$, можно быть уверенным в том, что всегда найдется достаточно яркая звезда. Чтобы отождествить звезду, делают набросок участка неба, отмечая положения двух или трех звезд, видимых в поле зрения искателя или главного инструмента, если звезд достаточно много. Замечают по хронометру разность времени прохождения объектов через нить микрометра, расположенную в на-

правлении север—юг, затем определяют на глаз или по разделенному кругу разность склонений и записывают оцененные звездные величины. Рис. 5.1 воспроизводит набросок, сделанный 24 июня 1976 г. с рефрактором 50 см в Ницце для наведения на новую двойную звезду BD + 31° 3890. Вовсе не обязательно, чтобы набросок точно воспроизводил взаимное положение звезд, так как измерено расстояние между ними, но важно при этом указать направление на север. По разделенным кругам определяют приближенные координаты α и δ одной из звезд, обычно самой яркой, и ищут в каталоге группу звезд, разности координат которых в пределах ошибок совпадают с оцененными из наблюдений. Этот метод отождествления быстр и эффективен. Если возникает сомнение, делают набросок, включающий большее число звезд.

Рис. 5.1. Отождествление звезды по каталогу BD. Отмечают на рисунке относительные положения звезд, видимых в телескоп, с оценкой их разделений, указанных в скобках. Точные значения соответствующих величин, найденные по каталогу, позволяют выполнить отождествление



И обратно, чтобы уверенно навести телескоп на звезду BD, нужно найти на небе звезды, разности координат которых близки к каталожным. Такое упражнение — первый шаг к освоению метода наблюдения двойных звезд, который выполняют все начинающие наблюдатели. Наведение больших инструментов на двойную звезду иногда оказывается весьма сложной задачей из-за гнутия трубы. Например, порой приходится проверять правильность координат новых слабых и тесных двойных звезд, открытых на рефракторе апертурой 50 см, с помощью 76-сантиметрового телескопа. Нужно начинать с наведения на яркую звезду в окрестности исследуемой звезды и определить инструментальные поправки, прежде чем искать на небе область, соответствующую данной карте окрестностей.

Во всех этих операциях астроном не делает никаких расчетов, а лишь снимает показания кругов, хронометра и смотрит в окуляр. Имеется один шанс из двух, что наблюдатель будет ошибаться и нервничать, если ему придется делать во время наблюдений даже простые расчеты, сидя на ступеньке в холодную ночь. Добавим также, что иногда круги склонения градуированы в полярных расстояниях, так что оцифровка в этом случае идет в противоположном направлении. После нескольких упражнений астроном выполняет все операции автоматически.

Отождествление слабой звезды требует некоторой доли терпения. Имеется тенденция обходить трудности, которые возникают во время наблюдений. Выявлением ошибок каталога и обнаружением потерянных объектов мы обязаны терпеливым наблюдателям, журналы наблюдений которых содержат точные заметки, очень полезные для уточнения данных. Первейший долг наблюдателя состоит в аккуратном хранении этих журналов.

Carte du Ciel — это результат исследований Парижской обсерватории в начале XX в. Это исследование состоит в фотографировании неба на квадратные пластиинки со стороной 2° с помощью практически идентичных астрографов, установленных на различных широтах. Сначала 18, а затем 20 обсерваторий участвовали в этой работе. Каждая обсерватория была снабжена астрографом с отверстием 33 см и фокусным расстоянием, близким к 3,44 м, что дает масштаб $1'/\text{мм}$. Было сфотографировано более 12 миллионов звезд и измерены положения многих миллионов звезд, которые были выражены в прямоугольных координатах.

В этой книге имеет смысл привести фундаментальные уравнения перехода от линейных координат на пластиинках к прямым восхождениям и склонениям. Это классическая задача перехода от координат на плоскости к координатам на сфере и обратно. Во всей полноте эта проблема описана в учебниках по астрометрии.

Для цели отождествления звезд не требуется громоздких формул, нужны простые соотношения, которые можно использовать для вычислений в уме. Как мы увидим ниже на одном примере, оказывается возможным отождествлять каждую звезду и получать ее координаты с точностью, гарантируемой *Carte du Ciel*, лишь с помощью простых вычислений.

В самом деле, речь в нашем случае идет лишь о том, чтобы, зная прямое восхождение и склонение светила, найти звезду в выпусках *Carte du Ciel*, слишком слабую и не содержащуюся в каталоге BD. Эта задача хорошо описана в *Journal des observateurs* за февраль 1928 г. Лягардом. Поскольку мы работаем в «малом поле», всего лишь несколько минут дуги, можно еще упростить задачу и найти ее быстрое решение.

1. Составим карту окрестностей отождествляемой звезды. Эта карта должна содержать по крайней мере две звезды: исключную и близкую к ней звезду, достаточно яркую, чтобы найти ее в каталоге BD или лучше в AGK2.

2. По каталогу ярких звезд определим, в какой зоне, а затем на какой пластиинке зоны эта область неба находится. Для вычислений лучше всего выбрать эпоху равноденствия 1900 г.

3. Приближенные прямоугольные координаты звезды X и Y

выражаются через известные экваториальные координаты α и δ следующим образом:

$$X = [(\alpha - A) \cos \delta]/4, \quad Y = \delta - D, \quad (5.1)$$

где A и D — экваториальные координаты теоретического центра пластиинки. Разности $\alpha - A$ выражаются в секундах времени, а разности $\delta - D$ — в минутах дуги. Уравнения (5.1) дают связь между координатами изображения на небесной сфере и касательной к ней плоскости, что не приводит к заметной ошибке, способной помешать отождествлению:

4. Координаты x и y каталогов связаны с координатами X и Y следующими линейными уравнениями:

$$X = K(x + Ax + By + C), \quad Y = K(y + A'x + B'y + C'), \quad (5.2)$$

где K, A, B, C, A', B', C' — постоянные, известные для каждой пластиинки. Для наших целей можно пренебречь величинами A, B, A', B' . Таким образом можно преобразовать величины X, Y в координаты x, y каталога с помощью следующей таблицы, которая определяет упрощенные формулы перехода для каждого из астрографов, принимавших участие в составлении *Carte du Ciel*.

Обсерватория	Зона	Упрощенные уравнения перехода	
		x	y
Гринвич	От +65 до +90°	$0,2X - c + 14$	$0,2Y - f + 14$
Ватикан	От +55 до +64	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Катания	От +47 до +54	$X - c$	$Y - c'$
Гельсингфорс (Хельсинки)	От +40 до +46	X^*	Y^*
Хайдерабад	От +36 до +39	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Икль—Оксфорд	+34 и +35	X	Y
	+32 и +33	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Потсдам— Оксфорд			
Оксфорд	От +25 до +31	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Париж	От +18 до +24	X^{**}	Y^{**}
Бордо	От +11 до +17	$X - A$	$Y - A'$
Тулуза	От +5 до +10	X	Y
Алжир	От -2 до +10	X	Y
Сан-Фернандо	От -3 до -9	$X - c_x$	$-Y - c_y$
Такубайа	От -10 до -16	$0,2X - c$	$0,2Y - c'$
Хайдерабад	От -17 до -23	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Кордoba	От -24 до -31	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Перт	От -32 до -40	$0,2X + 13 + C$	$0,2Y + 13 + F$
Канская	От -41 до -51	X	Y
Сидней	От -52 до -64	$-0,2X + 14 + C$	$0,2Y + 43 + F$
Мельбурн	От -65 до -90	$X - c$	$Y - f$

* Каталог дает α, δ для эпохи 1900 г.

** Опубликованы α, δ (1900) для звезд ярче 10-й фотографической звездной величины.

5. Вычисленные таким образом величины x , y очень близки к каталогным и их легко найти в каталоге. Обозначим их x^* , y^* . С другой стороны, на карте окрестностей мы обозначили разности $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ между координатами яркой и искомой звезды. Их можно преобразовать так:

$$\Delta x = 4 \cos \delta \Delta\alpha / K, \quad \Delta y = \Delta\delta / K, \quad (5.3)$$

что позволяет определить линейные приближенные координаты отождествляемого объекта: $x^* + \Delta x$, $y^* + \Delta y$. Их можно найти по каталогу: $x^* + \Delta x^*$, $y^* + \Delta y^*$. По точным разностям Δx^*

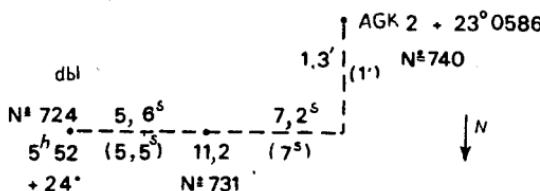


Рис. 5.2. Отождествление слабых звезд. Для этого находят в *Carte du Ciel* звезды с наблюдаемыми разделениями, указанными в скобках.

и Δy^* определяются поправки $\Delta\alpha^*$ и $\Delta\delta^*$, которые нужно ввести в экваториальные координаты α и δ яркой звезды, известные заранее. Фотографические величины обозначены в каталоге *Carte du Ciel*. Если наблюдаемая область богата звездами, то нужно нанести на карту окрестностей четыре или пять звезд, чтобы не колебаться в отождествлении.

Пример отождествления. Выберем фрагмент журнала наблюдений 16 ноября 1971 г. на рефракторе апертурой 50 см. Глядя на звезду AGK2 + 23° 586 (11,2) = BD + 23° 1147 (9,5), мы замечаем неизвестную пару в поле зрения телескопа; эта пара слишком слаба для каталога BD, будем искать ее в *Carte du Ciel*.

1. Строим карту окрестностей с помощью хронометра (как описано выше). Остальная часть работы выполняется на следующий день за рабочим столом (рис. 5.2).

2. Вычисляем координаты звезды AGK2 + 23° 586 $\alpha = 5^h 55^m 00,9^s$, $\delta = +23^\circ 54' 50''$ на эпоху 1900 г. Нужно, следовательно, искать звезду в Парижской зоне на пластинке с экваториальными координатами центра $D = 24^\circ$, $A = 5^h 52^m$.

3. Находим приближенные линейные координаты:

$$X = 0,25(\alpha - A) \cos \delta = 41,35, \quad Y = \delta - D = -5,2.$$

4. Для зоны Парижа имеем формулы перехода $x = X$ и $y = Y$ (см. таблицу); находим в каталоге истинные значения:

$$x^* = 41,51, \quad y^* = -5,13.$$

Это звезда № 740 на пластинке, ее звездная величина равна $11,0^m$.

5. Отождествляем новую двойную звезду:

$$\Delta x = -(12,5/4) \cos \delta = -2,86, \quad \Delta y = +1',$$

откуда

$$x^* + \Delta x = 41,51 - 2,86 = 38,65, \quad y^* + \Delta y = -5,13 + 1 = -4,13.$$

Находим в каталоге

$$x^* + \Delta x^* = 38,58, \quad y^* + \Delta y^* = -3,89.$$

Это звезда № 724, звездная величина которой $10,3^m$. Новую двойную, следовательно, можно обозначить так: Paris $+24^\circ 5^h 52^m$ № 724 (10,3).

Иногда заменяют название обсерватории индексом АС (*Astrographic Catalog*). Таким же способом отмечаем, что слабая звезда, звездная величина которой $11,2^m$, обозначенная на карте, есть звезда № 731 (10,8).

Остается найти точные экваториальные координаты новой двойной звезды. Истинные разности берутся из каталога:

$$\Delta \alpha^* = \Delta x K / (4 \cos \delta) = 12,8^s, \quad \Delta \delta^* = K \Delta y = +1,3',$$

затем определяем координаты новой двойной:

$$\alpha = 5^h 54^m 48,1^s, \quad \delta = +23^\circ 56' 08'' (1900).$$

Поскольку пластинки *Carte du Ciel* перекрываются, одну и ту же звезду почти всегда можно найти на двух пластинах. Выбирают пластинку, на которой звезда лежит ближе к центру. Наконец, для облегчения работы наблюдателей, которые будут в дальнейшем изучать эту звезду, принято указывать расстояние в секундах времени и минутах дуги по склонению данной двойной звезды от звезды каталога BD, наиболее близкой к ней. Полное отождествление новой двойной, следовательно, есть Paris $+24^\circ 5^h 52^m$ № 724 (10,3) $5^h 57^m 09^s$, $+23^\circ 56'$ (1950) на расстоянии -13^s и $+1'$ от BD $+23^\circ 1147$ (9,5).

Специальные каталоги

Как легко понять из названия, это списки звезд, представляющих предмет специального исследования и наблюдения или имеющих общие характеристики. Специальные каталоги весьма многочисленны; мы упомянем здесь только некоторые из них, наиболее полезные для наблюдателей двойных звезд. Наблюдатели главным образом интересуются парами с заметным орбитальным движением, следовательно, с большими параллаксами. Им нужны критерии близости звезд к Солнцу, которые можно

найти в каталогах тригонометрических параллаксов, собственных движений, спектральных классов.

Отметим сначала *General Catalogue of Trigonometrical Parallaxes* (Сводный каталог тригонометрических параллаксов) Дженинса (1952) и дополнение к нему, изданное в 1963 г. В нем приводятся параллаксы и собственные движения около 6000 звезд.

Каталог близких звезд Глизе (1969) дает параллаксы, собственные движения и содержит множество примечаний. Он более удобен для наблюдателей двойных звезд, чем каталог Дженинса.

Обсерватория Ловелла во Флагстаффе (США) опубликовала в 1971 г. каталог 9000 звезд с очень большими собственными движениями, содержащий также звездные величины и показатели цвета объектов. Положение звезд дано с точностью до 1^s по прямому восхождению и $0,1'$ по склонению по возможности со ссылками на Йельский каталог и каталог Аргеландера. Этот каталог возник в результате поиска белых и красных карликов, особенно активно проводимого Лейтеном и Гикласом. В этом важном каталоге, без сомнения, содержится множество неизвестных двойных, но их открытие потребует мощных телескопов, поскольку эти объекты имеют слабый блеск. Первичный материал для программы определения тригонометрических параллаксов слабых звезд, предпринятой Страндом на астрометрическом телескопе Морской обсерватории США, также включен в каталог Ловелла. В течение нескольких лет были опубликованы уже две сотни параллаксов предельно слабых звезд-карликов.

Каталог слабых красных звезд (*Survey of faint red stars*) издан в 1947 г. Дирборнской обсерваторией (США). Несмотря на свое название, этот каталог содержит объекты достаточно высокой яркости, доступные визуальным наблюдениям с инструментами умеренных размеров. В этом издании можно найти около 20 000 объектов, спектральная классификация которых основана на полосах поглощения окиси титана. К сожалению, положения звезд в нем недостаточно точны и не даны ссылки на другие каталоги.

Отметим еще *Henry Draper Catalogue* (Каталог Генри Дрепера), сокращенно обозначаемый HD, в котором приведены спектры 222 000 звезд, распределенных по всему небу. Этот важный труд, осуществленный на обсерватории Гарвардского университета, в Кембридже и Арекипе, издавался с 1918 по 1924 г. Каталог HD используется как справочник для классификации звездных спектров. К счастью, каталог HD соответствует каталогу BD, что позволяет проводить отождествление звезд, хотя положения звезд в каталоге HD не очень точны. Наблюдатели двойных звезд никогда не отождествляют свои объекты по каталогу HD, данные которого практически целиком содержатся

в каталогах AGK3 и SAO, но спектроскописты предпочитают каталог HD. Нужно отметить, что они почти всегда наблюдают звезды высокого блеска, отождествление которых не составляет труда. Не мешало бы астрометристам заняться этими объектами.

Отметим общее правило: нужно всегда давать ссылку на звезду в каталоге, по крайней мере указывать ее положение и звездную величину, или лучше давать ссылку на два каталога и приводить звездную величину. Наблюдатели теряют драгоценное время, чтобы заново определить координаты звезд, которые им сообщаются лишь иногда. Бывает даже, что объекты приведены без комментариев, отождествлены по малоизвестному каталогу, даны их нетрадиционные обозначения без указания положения и звездной величины. К тому же некоторые наблюдатели не знают смысла сокращений, введенных их предшественниками, и воспроизводят их, не задумываясь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Фундаментальные каталоги

Историю фундаментальных каталогов можно найти в наиболее поздних из них:

Fricke W., Kopff A. Fourth fundamental catalogue FK4, Veröff. Astron. Rehen-Institute, Heidelberg, No. 10, 1963.

Обширная библиография приведена в издании:

Scott F. P. The Systems of Fundamental Proper Motions, Basic Astron. Data, ch. II, Chicago Press, 1963.

Промежуточные каталоги

Историю каталогов, изданных до 1900 г., можно найти в следующем издании:

André Ch. Traité d'astronomie stellaire, Gauthier—Villars, 1899.

Boss B. General catalogue of 33.342 stars for the epoch 1950, Carnegie Inst., Washington, 1937.

Выпуски каталога AGK2 опубликованы под именами их авторов: *Schorr R., Kohlschütter A. Zweiter Katalog der Astronomischen Gesellschaft für das Aquinoktium 1950, Hamburg—Bergedorf, 1954.*

Йельский каталог издан в 20 выпусках «*Transactions of the Astronomical Observatory of Yale University*» с 1939 по 1959 г. SAO Star Catalog был издан Смитсонианской астрофизической обсерваторией в Кембридже, Массачусетте в 1966 г.

Общие каталоги

Каталог Аргеландера был переиздан в 1903 г.

Argelander F. Bonner Durchmusterung des Nördlichen Himmels, Bonn, 1903.

Выше мы приводили таблицу, включающую список обсерваторий, которые участвовали в создании *Carte du Ciel*. Некоторые результаты были опубликованы лишь после второй мировой войны, это зоны: + 32° и + 33° в 1953 г., + 34° в 1960 г., + 35° в 1962 г., + 36° в 1946 г. Отметим два ценных издания.

1. Catalogue photographique du ciel. Ascensions droites et déclinaisons, déduites des coordonnées rectilignes pour toutes les étoiles jusqu'à la grandeur 9,9 (équinoxe 1900.0). Zones $+18^\circ$, 20° , 22° , 24° , Obs. de Paris, Gauthier—Villars, 1946.
2. Catalogue de 11 755 étoiles de la zone $+17^\circ$ à $+25^\circ$ et de magnitude 9,5 à 10,5 destinées à servir de références pour la détermination des mouvements propres des étoiles du catalogue photographique de Paris, Obs. de Paris, 1950.

Van Biesbroeck G. Stars catalogues and charts, Basic Astron. Data, Chicago Press, 1963, p. 471.

Следующая статья дает практические таблицы для вычисления положений звезд по прямоугольным координатам пластиинок *Carte du Ciel: Heckmann O., Dieckvoss W., Cox H.* New Plate constants in the systems of FK3 for the declination zones $+21^\circ$, $+22^\circ$, $+23^\circ$, $+24^\circ$ of the astrographic catalogue, Paris, Astron. J., 59, 143, 1954.

Специальные каталоги

Aravamudan S. Stars with large proper motions in the astrographic zones $+32^\circ$ and $+33^\circ$, J. des Obs., XLII, 123, 1959.

Здесь можно найти ссылки на два более ранних списка.

Blanco V. M., Semers S., Douglass G. G., Fitzgerald M. P. Photometric Catalogue. Magnitudes and colors in the U, B, V, and U_c , B, V, systems. Publ. U. S. N. O. Sec. Ser., XXI, 1970.

Этот каталог включает 20 705 объектов, из которых большинство являются классическими двойными звездами, для них приведены спектральные классы и классы светимости.

Cannon A. J., Pickering E. C. The Henry Draper Catalogue, Ann. Harvard Obs., vol. XCI и следующие, 1918.

Giclas H. L., Burnham R., Jr., Thomas N. G. Lowell proper motion survey Northen Hemisphere. The G numbered stars. 8 991 stars fainter than magnitude 8 with motions $> .26/\text{year}$, Flagstaff, 1971.

Gliese W. Catalogue of nearby stars. Institut Heidelberg, No. 22, 1969.

Hoffleit D. Catalogue of bright stars, Yale Univ., 1964.

Jenkins L. F. General catalogue of trigonometric stellar parallaxes, Yale Univ., 1952.

Jenkins L. F. Supplement to the general catalogue of trigonometric stellar parallaxes, Yale Univ., 1963.

Klemola A. R., Vasilevskis S., Shane C. D., Wirtanen C. A. Catalogue of proper motions of 8790 stars with reference to galaxies, Publ. Lick Obs., XXII, part II, 1971.

Lee O. J., Baldwin R. J., Bartlett T. J., Gore G. D., Hamlin D. W. Dearborn catalog of faint red stars. Titanium oxide stars, Ann. Dearborn Obs., V, part 1A, 1943, part 1B, 1944, part 1C, 1947.

Riddle R. K. First Catalogue of trigonometric parallaxes of faint stars, Astrometric results. Publ. U. S. N. O. Sec. Ser., XX, part III, 1970.

Routly P. M. Second Catalog of trigonometric parallaxes of faint stars, Publ. U. S. N. O. Sec. Ser., XX, part VI, 1972.

Vyssotsky A. N. Dwarf M stars found spectrophotometrically, Astron. J., 61, No. 5, 1956.

Здесь можно найти ссылки на другие списки, объединяющие 876 объектов. Уорли открыл 30 тесных пар из этого списка.

Глава 6

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОРБИТ И ЗВЕЗДНЫХ МАСС

Для чего наблюдаются двойные звезды

Цель наблюдения двойных звезд состоит в определении их орбит, что дает возможность определить звездные массы при известных параметрах Солнечной системы. В этом случае массы звезд определяются по их видимым орбитам. Это так называемые фундаментальные или геометрические массы, они основаны только на гипотезе о справедливости закона всемирного тяготения и правильности значения постоянной гравитации. Все другие методы определения масс используют более или менее правдоподобные дополнительные гипотезы относительно звездных характеристик; таким образом получаются массы, называемые фотометрическими или спектроскопическими. Как мы увидим ниже, изучение орбит двойных звезд позволяет определять массы, называемые динамическими, а иногда определять абсолютный параллакс и, следовательно, абсолютные массы путем дополнительного измерения лучевых скоростей.

В этой главе после изложения основных понятий, необходимых для вычисления орбит, мы сделаем обзор нескольких методов, а затем применим их к вычислению абсолютных и динамических масс. Наконец, мы подведем итог тому, что удалось узнать о звездных массах на протяжении двух веков наблюдений.

Истинная орбита

Звезда-спутник B движется по отношению к главной звезде A так, как если бы последняя была фиксированным центром притяжения, имеющим массу, равную массе системы. Движение происходит в прямом или обратном направлении.

Пусть эллипс с центром O и одним из фокусов A представляет орбиту системы. Периастр P — это точка орбиты, наиболее близкая к точке A ; апоастром называется наиболее удаленная от A точка. Элементы, или параметры истинной орбиты, следующие:

период обращения компонента в годах P ,
среднее годичное движение $n = 360/P$ или $\mu = 2\pi/P$,

эпоха прохождения спутника черезperiастр T , эксцентриситет орбиты e , иногда его обозначают $e = \sin \varphi$, большая полуось a , выраженная в угловой мере или в астрономических единицах.

В небесной механике доказано, что траектория компонента B , или орбита, есть эллипс, один из фокусов которого совпадает с главной звездой A . Мы отсылаем читателя к специальным работам, где можно найти обоснование этого факта. Здесь мы остановимся лишь на том, что необходимо для вычисления орбит, предполагая, что элементарные геометрические свойства конических сечений известны читателю.

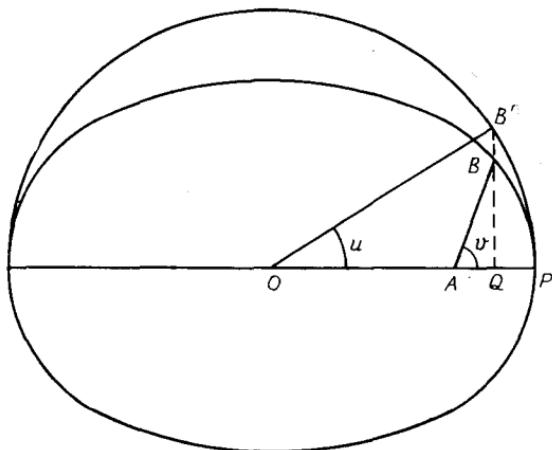


Рис. 6.1. Истинная орбита

Определим положение звезды-спутника B на его орбите как функцию времени. Это положение определяется двумя параметрами: радиусом-вектором $AB = r$ и углом $v = PAB$, называемым *истинной аномалией*. Проведем окружность радиуса OP (рис. 6.1). Эта окружность носит неудачное название «главный круг». Опустим перпендикуляр из точки B на радиус OP , он пересекает OP в точке Q . Угол $POB' = u$ называется *эксцентрической аномалией*. Выберем на OP положительное направление от точки O к точке P . Тогда

$$\vec{AQ} = \vec{AO} + \vec{OQ} = -ae + a \cos u = r \cos v, \quad (6.1)$$

$$QB = QB' (1 - e^2)^{1/2} = a (1 - e^2)^{1/2} \sin u = r \sin v, \quad (6.2)$$

поскольку эллипс есть проекция главного круга на плоскость, наклоненную на угол φ . Из формул (6.1) и (6.2) находим

$$r = a (1 - e^2) / (1 + e \cos v). \quad (6.3)$$

Остается связать истинную аномалию v с временем t . Это можно сделать, используя промежуточную величину — эксцентрическую аномалию u . Известно, что радиус-вектор описывает равные площади в равные промежутки времени:

$$(r^2/2) dv/dt = c = \pi a^2 \cos \phi / P = (\mu a^2 \cos \phi) / 2,$$

где c — постоянная площадей, равная площади эллипса, деленной на период.

С другой стороны,

$$\operatorname{tg}(v/2) = [(1+e)/(1-e)]^{1/2} \operatorname{tg}(u/2), \quad (6.4)$$

что после дифференцирования приводит к выражению

$$du/dt = \mu (1 - e \cos u),$$

откуда интегрированием находим

$$u - e \sin u = \mu (t - T) = M.$$

Принято выражать величину M в градусах, тогда имеем

$$M = n(t - T). \quad (6.5)$$

Величина M называется *средней аномалией*, она пропорциональна времени, отсчитываемому от момента прохождения через перигастр, и определяет среднее положение компонента, а величина v характеризует истинное положение компонента. Разность $v - M$ называется уравнением центра. Переход от M к v производится с помощью таблиц, вычисленных по уравнениям (6.4) и (6.5).

Назовем приведенными координатами компонента B величины

$$X = (r/a) \cos v = \cos u - e, \quad Y = (r/a) \sin v = (1 - e^2)^{1/2} \sin u. \quad (6.6)$$

Таблицы дают эти величины для любых значений M как функцию эксцентриситета.

Видимая орбита

Видимая орбита получается в результате проецирования истинного эллипса на картинную плоскость. К элементам истинной орбиты, называемым динамическими, нужно добавить геометрические элементы, определяющие ориентацию истинной орбиты по отношению к картинной плоскости. Рассмотрим рис. 6.2, на котором изображена плоскость истинной орбиты, спроектированная на картинную плоскость. Пересечением двух плоскостей является прямая NN' . Главная звезда A лежит одновременно в двух плоскостях. Компонент B' проецируется в точку B . Большая полуось истинной орбиты a выражается

в секундах дуги. Применяются две системы геометрических элементов: элементы Кэмпбелла и элементы Тиля—Иннеса.

Элементы Кэмпбелла следующие:

i — наклонение орбиты, угол между плоскостью орбиты и картинной плоскостью. Наклонение i заключено между 0 и 180° , оно меньше 90° , если движение прямое.

Ω — позиционный угол, определяющий положение линии пересечения плоскостей NN' . Эта линия называется *линией узлов*.

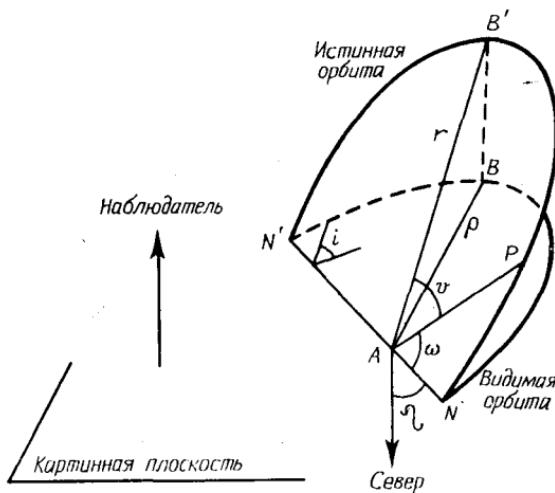


Рис. 6.2. Видимая орбита. Определение основных параметров

лов. Позиционный угол отсчитывается от направления на северный полюс. Линия узлов пересекает эллипс в двух точках; одна точка называется *восходящим узлом* (в нем лучевая скорость компонента соответствует его приближению к наблюдателю), другая точка называется *нисходящим узлом*. Обычно не известно, какой из узлов восходящий, тогда из двух возможных значений Ω выбирают значение, меньшее 180° .

ω — долгота периастра, угол между линией узлов и направлением от главной звезды на периастр, измеряемый в плоскости истинной орбиты в направлении движения компонента.

Ниже приведена полная система элементов орбиты визуально-двойной звезды.

Динамические элементы

P — период в годах,

n — среднее движение в градусах в год $360/P$,

T — эпоха прохождения периастра,
 e — эксцентриситет,
 a — большая полуось.

Геометрические элементы в системе Кэмпбелла

i — наклонение орбиты,
 Ω — позиционный угол линии узлов,
 ω — угол между узлом и периастром.

Определение орбиты двойной звезды состоит в нахождении ее элементов исходя из данных наблюдений.

Выведем уравнения, связывающие эти элементы и наблюдаемые параметры, рассмотренные в гл. 3: разделение ρ , позиционный угол θ и время t .

Согласно предыдущим определениям, имеем (см. рис. 6.2, движение предполагается прямым)

$$AB = \rho, \quad AB' = r$$

$$PAB = v, \quad NAP = \omega, \quad BAN = \theta - \Omega.$$

Спроектируем ρ и r на линию узлов NN' :

$$\rho \cos(\theta - \Omega) = r \cos(v + \omega), \quad (6.7)$$

затем на перпендикуляр к линии узлов

$$\rho \sin(\theta - \Omega) = r \sin(v + \omega) \cos i, \quad (6.8)$$

откуда получаем основные уравнения:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\theta - \Omega) &= \operatorname{tg}(v + \omega) \cos i, \\ \rho &= r \frac{\cos(v + \omega)}{\cos(\theta - \Omega)} = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v} \frac{\cos(v + \omega)}{\cos(\theta - \Omega)}, \\ M &= n(t - T). \end{aligned}$$

(6.9)

Добавим к этим уравнениям уравнение, дающее компонент по лучу зрения:

$$BB' = z = r \sin(v + \omega) \sin i. \quad (6.10)$$

Уравнения (6.9) позволяют вычислить эфемериду двойной звезды, т. е. значения ρ и θ через правильные или неправильные промежутки времени.

Для практических целей нужно располагать таблицей, определяющей кеплеровское движение, которая дает истинную аномалию или же уравнение центра ($v - M$) как функцию средней аномалии для всех значений эксцентриситета. Можно найти

такую таблицу в книге Данжона *L'Astronomie générale* на стр. 432. Академия наук СССР опубликовала в 1960 г. очень полные таблицы, к сожалению, мало распространенные в астрономических учреждениях других стран. Карманные электронные калькуляторы позволяют вычислять эфемериды очень быстро. Мы приведем здесь пример вычисления эфемериды Кастора.

Эфемерида Кастора
Орбита Мюллера (1956)

$$\begin{array}{ll} P = 511,3 & n = 0,70409^\circ \\ e = 0,36 & i = 112,94^\circ \end{array} \quad \begin{array}{ll} T = 1950,65 & a = 7,369'' \\ \Omega = 41,65^\circ & \omega = 239,81^\circ \end{array}$$

	$t - T$	M	v	$v + \omega$	$\operatorname{tg}(v - \omega)$	$\operatorname{tg}(\theta - \Omega)$	$\theta - \Omega$	θ
1978,0	27,35	19,26°	41,82°	281,63°	-4,8587	1,8938	62,16°	103,8°
1979,0	28,35	19,96	43,21	283,02	-4,3246	1,6856	59,32	101,0
1980,0	29,35	20,67	44,60	284,41	-3,8919	1,5169	56,61	98,3
1981,0	30,35	21,37	45,95	285,76	-3,5434	1,3811	54,09	95,7
1982,0	31,35	22,07	47,29	287,10	-3,2506	1,2670	51,72	93,4
1983,0	32,35	22,78	48,63	288,44	-2,9991	1,1690	49,45	91,1
1984,0	33,35	23,48	49,95	289,76	-2,7837	1,0850	47,33	89,0

t	$\cos v$	r	$\cos(v + \omega)$	$\cos(\theta - \Omega)$	$\frac{\cos(v + \omega)}{\cos(\theta - \Omega)}$	ρ
1978,0	0,7452	5,0572	0,2016	0,4669	0,4317	2,18"
1979,0	0,7288	5,0808	0,2253	0,5102	0,4416	2,34
1980,0	0,7120	5,1053	0,2489	0,5504	0,4521	2,31
1981,0	0,6953	5,1299	0,2716	0,5865	0,4631	2,38
1982,0	0,6783	5,1552	0,2940	0,6196	0,4746	2,45
1983,0	0,6609	5,1812	0,3163	0,6501	0,4866	2,52
1984,0	0,6435	5,2076	0,3381	0,6777	0,4988	2,60

Элементы Тиля—Иннеса. Выберем прямоугольную систему координат с началом в главной звезде A . Ось Ax направлена к северному полюсу, ось Ay — в направлении возрастания прямого восхождения и ось Az — к наблюдателю (рис. 6.3).

Компонент B' проецируется на небо в точку B . Тогда имеем: $AB = \rho$, $xAB = \theta$, $AB' = r$. Координаты точки B' следующие:

$$x = \rho \cos \theta, \quad y = \rho \sin \theta, \quad (6.11)$$

и z дается уравнением (6.10).

Подставляя приведенные координаты (6.6) в формулы (6.10) и (6.11), получим после элементарных преобразований

$$x = AX + FY, \quad y = BX + GY, \quad z = CX + HY, \quad (6.12)$$

где

$$\begin{aligned} A &= a (\cos \omega \cos \Omega - \sin \omega \sin \Omega \cos i), \\ B &= a (\cos \omega \sin \Omega + \sin \omega \cos \Omega \cos i), \\ F &= a (-\sin \omega \cos \Omega - \cos \omega \sin \Omega \cos i), \\ G &= a (-\sin \omega \sin \Omega + \cos \omega \cos \Omega \cos i), \\ C &= a \sin \omega \sin i, \\ H &= a \cos \omega \sin i. \end{aligned} \quad (6.13)$$

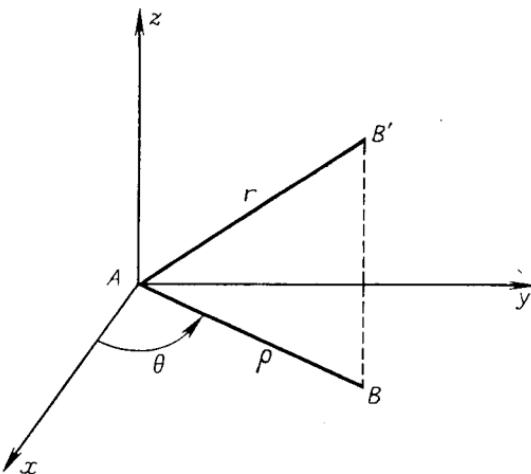


Рис. 6.3.

Постоянныe A, B, F, G, C, H называются элементами Тиля—Иннеса, они определяют положение истинной орбиты и размер орбиты, так же как и элементы Кэмпбелла ω, Ω, i, a .

Запишем теперь уравнения перехода от элементов Тиля—Иннеса к элементам Кэмпбелла. Их легко найти с помощью формул (6.13):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg}(\Omega + \omega) &= (B - F)/(A + G) \text{ при } 0 < \Omega < 180^\circ, \\ \operatorname{tg}(\Omega - \omega) &= (B + F)/(A - G), \\ \operatorname{tg}^2(i/2) &= (B + F) \sin(\Omega + \omega)/(B - F) \sin(\Omega - \omega). \\ a^2 &= (AG - BF)/\cos i. \end{aligned} \quad (6.14)$$

Элементы орбиты визуально-двойной звезды целесообразно записывать в системе Кэмбелла и Тиля—Иннеса. С помощью элементов Тиля—Иннеса эфемериды вычисляется почти мгновенно с помощью таблиц приведенных координат X , Y , даваемых для любых значений M как функция эксцентриситета e . Иногда эти таблицы трудны для употребления, поскольку пятизначные числа и их табличные разности даны мелким шрифтом, что утомляет зрение. Как только величины X и Y известны, легко найти из уравнения (6.12)

$$\rho = (x^2 + y^2)^{1/2}, \quad \theta = \operatorname{arctg} (y/x).$$

Лучевая скорость спутника по отношению к главной звезде выражается в виде

$$dz/dt = CdX/dM + HdY/dM = nCdX/dM + nHdY/dM,$$

где M в градусах. Таким образом, имеем лучевую скорость в секундах дуги в год. Ее преобразуют в км/с, вводя абсолютный параллакс ρ и коэффициент преобразования единиц:

$$V [\text{км/с}] = LdX/dM + NdY/dM, \quad (6.15)$$

где $L = 4,737 \text{ нС}/\rho$, $N = 4,737 \text{ нН}/\rho$.

Заметим также, что, подставляя (6.10), можно получить

$$V [\text{км/с}] = 4,737 \mu \frac{a \sin i}{\rho \cos \varphi} e \cos \omega + \cos (v + \omega), \quad (6.16)$$

где a и ρ выражены в секундах дуги.

Формулы (6.15) и (6.16) показывают, что если элементы орбиты известны, то измерение относительной лучевой скорости дает абсолютный параллакс системы.

Приведем еще несколько замечаний о геометрическом смысле постоянных A , B , F , G . Легко видеть, что координаты центра видимого эллипса следующие:

$$x_c = -Ae, \quad y_c = -Be. \quad (6.17)$$

Если выбрать центр видимого эллипса за начало координат с осями ξ , η , параллельными осям x , y и имеющими то же направление, легко получить для точки с истинной аномалией u

$$\xi = A \cos u + F_1 \sin u, \quad \eta = B \cos u + G_1 \sin u, \quad (6.18)$$

где $F_1 = F \cos \varphi$, $G_1 = G \cos \varphi$. Эти уравнения показывают, что A и B — координаты периастра P по отношению к центру ($u = 0$), а F_1 и G_1 — координаты точки с истинной аномалией $u = 90^\circ$, лежащей на диаметре, сопряженном проекции большой оси в точке пересечения, которая встречается первой, если двигаться от точки P в прямом направлении. Наконец, направляющие косинусы положительных направлений большой и ма-

лой осей истинной орбиты даются следующими формулами: A/a , B/a , C/a и F/a , G/a , H/a .

В заключение приведем полный набор элементов орбиты:

Динамические элементы	Элементы Кэмпбелла	Элементы Тиля — Иннеса
P		A
n	i	B
T	Ω	F
e	ω	G
a		H

Введя эти определения, легко вычислить элементы орбиты двойной звезды.

Вычисление элементов орбиты двойной звезды

Известно множество методов, которые можно подразделить на два класса: геометрические и аналитические. Первые методы более быстрые, но дают менее надежные элементы. Они используются в случае, когда орбита плохо известна либо из-за трудностей для наблюдения и оставлена для мощных инструментов, либо потому, что длина периода позволила пронаблюдать только более или менее значительную часть полной орбиты.

Периоды визуально-двойных звезд чаще всего так велики, что вычислитель не может ждать, когда орбита будет полностью очерчена наблюдениями. В большинстве случаев даже целой жизни наблюдателя недостаточно для этого. Поэтому приходится вычислять предварительные элементы, которые дают эфемериду с ошибками, или даже довольствоваться частью видимого эллипса. В литературе нет ни одного случая, чтобы для хорошо от наблюденной пары на протяжении всего периода обращения не были вычислены элементы орбиты. Если такая пара существует, она ревниво хранится в секрете своим открывателем, который оставляет за собой право на приоритет вычисления орбиты. Такие секретные пары все более и более редки, но они воз награждают прилежного наблюдателя.

Ежегодно в мире рассчитывается примерно 60 орбит, причем более половины представляют собой уточнение прежних орбит. Среди 700—800 орбит, опубликованных к настоящему времени, орбиты, элементы которых хорошо определены, весьма редки, и число их составляет лишь несколько десятков. Поэтому для вычислителя элементов орбит визуально-двойных звезд работы непечатый край.

Основные трудности связаны с ошибками измерений. Только опытный наблюдатель, знающий историю наблюдений, может вывести довольно точные элементы орбиты, исходя из разрозненных наблюдений, слишком редких в одни эпохи и многочисленных в другие. Измерения некоторых наблюдателей — вне всяких сомнений, измерениями других, напротив, можно пренебречь. Но нужны годы практики, чтобы научиться оценивать качество измерений той или иной пары. Современные методы численного анализа в данном случае совершенно неприменимы. К вычислению орбиты двойной звезды никогда не удастся привлечь современную технику.

Прежде чем приступить собственно к вычислениям, следует привести все наблюдения к одной эпохе равноденствия. Поляс мира, от направления на который отсчитываются позиционные углы, не занимает фиксированного положения. Поэтому следует исправлять позиционный угол по формуле

$$\Delta\theta = -0,0056^\circ \sin \alpha \sec \delta (t - t_0), \quad (6.19)$$

где t_0 — выбранная эпоха равноденствия, а t — эпоха наблюдений. Обычно для t_0 выбирают эпоху, близкую к первым наблюдениям, чтобы поправки были как можно меньше или пренебрежимо малы, например эпоху 1900 или 1950. Позиционные углы преобразуются следующим образом:

$$\theta_t = \theta_0 + \Delta\theta. \quad (6.20)$$

Собственное движение также искажает позиционный угол; иногда совершают ошибку, не учитывая этого. Поправка в таком случае записывается в виде

$$\Delta\theta = -0,00417^\circ \mu_\alpha \sin \delta (t - t_0), \quad (6.21)$$

где μ_α выражено в секундах времени в год. Эта поправка может быть существенной для окрестностей поляса и для пар с большим собственным движением. Другие поправки обусловлены изменением параллакса со временем, но они пренебрежимо малы.

Ошибки, связанные с переходом от центральной проекции к ортогональной, также пренебрежимо малы. Тем не менее нужно иметь в виду, что наблюдаемый период является лишь видимым. Истинный период меньше или больше на время, которое затрачивает свет, чтобы пройти путь, связанный с движением его по лучу зрения в течение периода; это время редко превышает несколько сотых года.

Геометрический метод. Мы опишем наиболее простой из всех методов, полностью графический, позволяющий вычислять элементы за несколько минут, как только начертан видимый эллипс.

Точность элементов зависит от точности проведения этого эллипса, которому нужно уделить наибольшее внимание. Эта

операция была описана многими французскими авторами, в частности Данжоном и Бэзом. Она состоит в нанесении на график отдельных наблюдений, приведенных к одной эпохе. Если компонент сделал много оборотов, то предварительно определяют период по моментам возвращения компонента в одни и те же позиционные углы и приводят наблюдения к одному и тому же повороту. Выбирают достаточно большой масштаб, чтобы исключить ошибки проведения кривой; 30 см для большой полуоси вполне подходит.

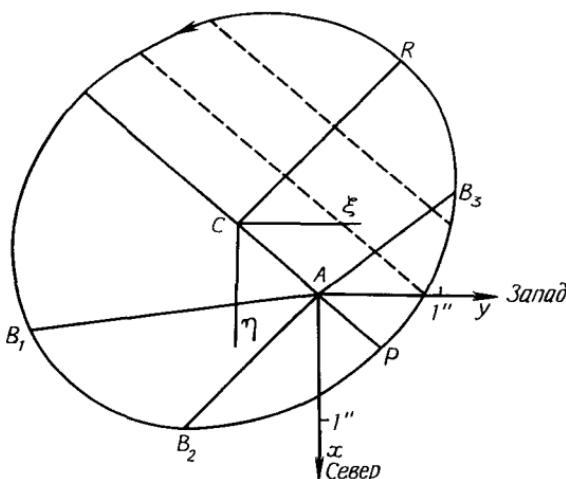


Рис. 6.4. Вычисление элементов орбиты геометрическим методом.

Нанеся на график наблюдения с указаниями эпох и имен наблюдателей, получают «облако» точек, часто далекое по форме от искомой орбиты. Можно использовать прием, состоящий в проведении предварительной кривой $\theta(t)$ от руки. Таким образом можно заметить ошибочные наблюдения, которые всегда существуют. Но при этом следует осторегаться исправлять выявленные таким образом ошибки, так как кривая $\theta(t)$ является всего лишь приближенной, ее роль состоит в том, чтобы указать тенденцию и порядок величины ошибок некоторых наблюдений, которые в дальнейшем будут рассмотрены отдельно или просто исключены. Не рекомендуется строить кривую $\rho(t)$, поскольку измерения угловых расстояний отягощены еще большими ошибками.

Нанеся на график наблюдения, попытаемся провести эллипс. Этот эллипс должен удовлетворять закону площадей. Бэз советует проводить эллипс классическим способом: с помощью нитки и двух булавок. Главная звезда A (рис. 6.4) не лежит в од-

ном из фокусов видимого эллипса, поскольку этот эллипс есть проекция на картинную плоскость истинной орбиты.

Из наилучших наблюдений выбирают 5 или 6 точек, распределенных вдоль эллипса; соединяют их с точкой A и планиметром измеряют в произвольных единицах площади построенных таким образом секторов. Если S_n — площадь n -го сектора и Δt_n — время, за которое спутник проходит этот сектор, то постоянная площадей запишется следующим образом:

$$c = S_n / \Delta t_n; \quad (6.22)$$

она должна быть одинаковой для всех выбранных секторов. Этого не так просто достичь без многократных попыток, в результате которых окончательная кривая иногда сильно отличается от первоначальной. Константа площадей не должна меняться больше, чем на несколько сотых от одного сектора к другому, в противном случае найденные элементы не смогут корректно воспроизвести наблюдения. Найдя константу площадей в произвольных единицах, планиметром измеряют площадь эллипса в тех же единицах, повторяют эту операцию много раз и берут среднее из измеренных значений S . Тогда период есть

$$P = S/c. \quad (6.23)$$

Если период известен заранее, то заданное и определенное значения периода должны совпадать.

Проведение видимого эллипса очень редко приносит вычислителю удовлетворение, иногда ему приходится проводить эллипс вне наблюдаемых точек. В сущности, эта операция основана на выборе видимых фокусов с учетом того, что их положение может быть в случае необходимости совершенно изменено. Вычислитель должен проверить себя, если проведенная кривая не подчиняется закону площадей. Бывает даже, что эллипс, построенный на основе наблюдаемых точек, является грубо ошибочным.

Построив видимую орбиту, тщательно отмечают ее центр (рис. 6.4), который совпадает с центром истинной орбиты. Ось CA — проекция большой оси, она пересекает эллипс в точке P , проекции периастра. Тогда эксцентриситет измеряется непосредственно: $e = CA/CP$.

Момент прохождения через периаст T получается без труда: либо непосредственно считывается с кривой $\theta(t)$ эпоха, соответствующая положению точки P , либо, что более предпочтительно, T находится описанным ниже способом по наблюдениям, выбранным для определения постоянной площадей. С этой целью рассмотрим рис. 6.4, где указаны последовательные положения компонента B_1, B_2, P, B_3 . Согласно закону площадей, имеем

$$T = t_{B_1} + B_1 AP/c = t_{B_2} + B_2 AP/c = t_{B_3} - B_3 AP/c. \quad (6.24)$$

Эти три значения T должны быть очень близки, из них берут среднее. Впрочем, для определения T можно брать столько наблюдений, сколько хочется вычислителю.

Таким образом, имеем динамические элементы, за исключением величины a :

$$P; \quad n = 360/P, \quad \text{или} \quad \mu = 2\pi/P; \quad T; \quad e.$$

Остается найти элементы, определяющие положение орбиты, и большую полуось. Их можно найти с помощью уравнения (6.18). Здесь A и B являются координатами точки P по отношению к центру C и считаются с графика, где за единицу длины выбрана $1''$. Чтобы найти диаметр, сопряженный с CP , проводим хорды, параллельные CP . Линия, проведенная через их середины, и определяет искомый диаметр. Пусть R — найденная точка (рис. 6.4). Ее координаты по отношению к центру C считаются с графика:

$$\xi_R = F_1 = F \cos \varphi, \quad \eta_R = G_1 = G \cos \varphi. \quad (6.25)$$

Получив четыре постоянные A , B , F , G , используем формулы перехода (6.14) для определения i , Ω , ω , a и постоянных C и H , служащих для вычисления лучевых скоростей. Остается сравнить эфемериду, определяемую этими элементами, с наблюдениями.

Метод Тиля—Иннеса—ван ден Боса. В этом методе используется информация о трех произвольных положениях спутника; он в принципе подобен методам, используемым при вычислении орбит планет, и с этой точки зрения имеет много поучительных моментов.

Проведя видимый эллипс, хорошо удовлетворяющий закону площадей, выбирают в направлении возрастания времени три положения, называемые средними или нормальными местами, на отрезках эллипса, лучше всего представленных наблюдениями. Пусть

$$\begin{aligned} t_1 \rho_1 \theta_1 \quad x_1 &= \rho_1 \cos \theta_1 & y_1 &= \rho_1 \sin \theta_1 \\ t_2 \rho_2 \theta_2 \quad x_2 &= \rho_2 \cos \theta_2 & y_2 &= \rho_2 \sin \theta_2 \\ t_3 \rho_3 \theta_3 \quad x_3 &= \rho_3 \cos \theta_3 & y_3 &= \rho_3 \sin \theta_3 \end{aligned} \quad (6.26)$$

есть таблица, дающая эпохи, разделения, позиционные углы и прямоугольные координаты этих трех точек. Постоянная площадей S известна после проведения видимого эллипса. Поскольку S — полная площадь эллипса, находим период $P = S/c$. С другой стороны, $\mu = 2\pi/P$, или $n = 360/P$, соответственно в радианах или градусах в год.

Рассмотрим треугольник $A12$ (рис. 6.5):

$$S_{12} = 1/2 \rho_1 \rho_2 \sin (\theta_2 - \theta_1) = x_1 y_2 - x_2 y_1,$$

что дает после подстановки выражений $x = AX + FY$, $y = BX + GY$

$$S_{12} = (c/2\mu) [\sin(u_2 - u_1) - \sin\varphi (\sin u_2 - \sin u_1)]. \quad (6.27)$$

Согласно уравнению Кеплера,

$$t_2 - t_1 = (1/\mu) [u_2 - u_1 - e(\sin u_2 - \sin u_1)].$$

После простых преобразований получаем

$$t_2 - t_1 - (S_{12}/c) = (1/\mu) [u_2 - u_1 - \sin(u_2 - u_1)]. \quad (6.28)$$

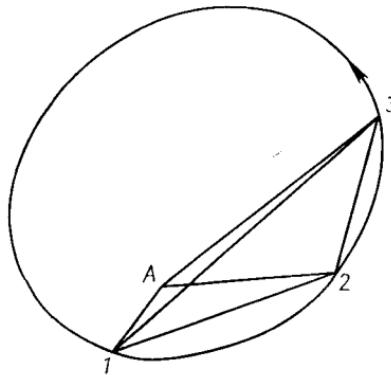


Рис. 6.5.

Это фундаментальное уравнение Тиля. Подставим $u_2 - u_1 = \alpha$, $u_3 - u_2 = \beta$, $u_3 - u_1 = \alpha + \beta$. Тогда имеем

$$\alpha - \sin \alpha = \mu (t_2 - t_1) - 2\pi S_{12}/S,$$

$$\beta - \sin \beta = \mu (t_3 - t_2) - 2\pi S_{32}/S, \quad (6.29)$$

$$(\alpha + \beta) - \sin(\alpha + \beta) = \mu (t_3 - t_1) - 2\pi S_{31}/S.$$

Правые части этих уравнений известны после проведения эллипса по наблюдениям. Два первых уравнения дают α и β , третье служит для контроля. Если есть расхождение, значит, видимый эллипс проведен неправильно и нужно начинать все сначала.

Из соотношения (6.27) получаем последовательно

$$S_{12} + S_{23} - S_{13} = (c/2\mu) [\sin \alpha + \sin \beta - \sin(\alpha + \beta)], \quad (6.30)$$

$$S_{23} \sin \alpha - S_{12} \sin \beta = (c/2\mu) e [\sin \beta (\sin u_2 - \sin u_1) - \sin \alpha (\sin u_3 - \sin u_2)].$$

Подставляя $u_1 = u_2 - \alpha$, $u_3 = u_2 + \beta$, из этого последнего соотношения имеем

$$\begin{aligned} S_{23} \sin \alpha - S_{12} \sin \beta &= (c/2\mu) e \sin u_2 [\sin \alpha + \\ &\quad + \sin \beta - \sin(\alpha + \beta)]. \end{aligned} \quad (6.31)$$

Таким же образом получаем

$$\begin{aligned} S_{23} \cos \alpha + S_{12} \cos \beta - S_{13} &= (c/2\mu) e \cos u_2 [\sin \alpha + \\ &\quad + \sin \beta - \sin(\alpha + \beta)]. \end{aligned} \quad (6.32)$$

Уравнения (6.30) — (6.32) дают два фундаментальных соотношения

$$\begin{aligned} e \sin u_2 &= (S_{23} \sin \alpha - S_{12} \sin \beta) / (S_{12} + S_{23} - S_{13}), \quad (6.33) \\ e \cos u_2 &= (S_{23} \cos \alpha + S_{12} \cos \beta - S_{13}) / (S_{12} + S_{23} - S_{13}). \end{aligned}$$

Все члены в правой части полностью известны, откуда получаем e и u_2 , затем $u_1 = u_2 - \alpha$ и $u_3 = u_2 + \beta$. Тогда можно вычислить $M_1 = u_1 - e \sin u_1$, M_2 и M_3 , откуда эпоха прохождения через периастр равна

$$T = t_1 - (M_1/n) = t_2 - (M_2/n) = t_3 - (M_3/n).$$

Все три величины должны быть очень близки.

Этот первый этап вычислений дает нам динамические элементы: P , u , e , T . Остается вычислить константы A , B , F , G . Из уравнения (6.12) имеем

$$x_i = AX_i + FY_i, \quad y_i = BX_i + GY_i,$$

$i = 1, 2, 3$. Мы имеем четыре неизвестные и шесть уравнений. Их можно решить методом наименьших квадратов или вычислить неизвестные, используя положения 1 и 3, а затем использовать положения 2 и 1 для контроля.

Если уравнения (6.33) обращаются в нуль, т. е. эксцентриситет равен нулю, то истинная орбита является окружностью и периастр отсутствует. Договорились в этом случае принимать за начальную эпоху момент прохождения через узел. Если к тому же наклонение равно нулю, ни периастр, ни узел не определяются, и в этом случае спутник движется по окружности с равномерной скоростью.

Определив константы A , B , C , F , G , переходим к определению элементов a , i , ω по формулам (6.14).

Метод Тиля—Иннеса—ван ден Боса приносит удовлетворение сознанию, но не самому вычислителю. В самом деле, в системе уравнений (6.33) члены в правой части содержат разности

в числителе и знаменателе, которые могут быть очень малыми. В этом случае эксцентризитет e и аномалия ι_2 определяются неточно. Следовательно, приходится начинать сначала и выбирать более подходящие секторы. При этом все дело упирается в нормальные места, которые следует подбирать эмпирически.

Пример. Звезда ADS 1227 = A 1913, звездные величины 9,5 и $9,5^m$, $\alpha = 1^h31^m06^s$, $\delta = +34^\circ24'$ (1950).

Эта двойная звезда, открытая в 1908 г., прошла по орбите дугу всего 120° с момента ее открытия. В 1975 г. орбита ее была вычислена Эрсегом на основе ряда наблюдений, прерывающегося в 1961 г. Измерение, выполненное в Ницце в 1976 г., показывает, что эта орбита не является истинной. Это хороший случай для применения метода Тиля—Иннеса — ван ден Боса.

Начнем с группировки наблюдений, которые представлены в следующей таблице.

t	θ	ρ	Число наблюдений	Наблюдатель	Инструмент	Апертура, см
1908,87	267,0°	0,22"	3	Эйткен	Рефрактор Ликской обсерватории	91
1920,68	247,0	0,22	5	»	То же	91
1930,29	237,5	0,20	2	ван Бисбрук	Рефрактор Йеркской обсерватории	102
1934,09	242,9	0,23	2	Эйткен	Рефрактор Ликской обсерватории	91
1948,78	205,8	0,18	2	ван Бисбрук	Рефлектор обсерватории Мак-Дональда	210
1958,66	182,3	0,20	3	ван ден Бос	То же	
1961,73	181,5	0,18	2	Куто	Рефрактор Йеркской обсерватории	102
1965,051	173,6	0,19	4	Уорли	Рефрактор Вашингтонской обсерватории	66
1965,794	170,0	0,22	3	»	Рефлектор Флагстаффской станции ВМС США	102
1967,78	165,2	0,17	3	Куто	Рефрактор обсерватории в Ницце	50
1969,74	157,7	0,17	2	»	То же	50
1976,81	144,6	0,20	1	»	»	74

В ней приведены также имя наблюдателя, использованный инструмент и число наблюдений. Поправки и прецессии пренебрежимо малы. Нанесем эти наблюдения на график и проведем эллипс, руководствуясь законом площадей (рис. 6.6).

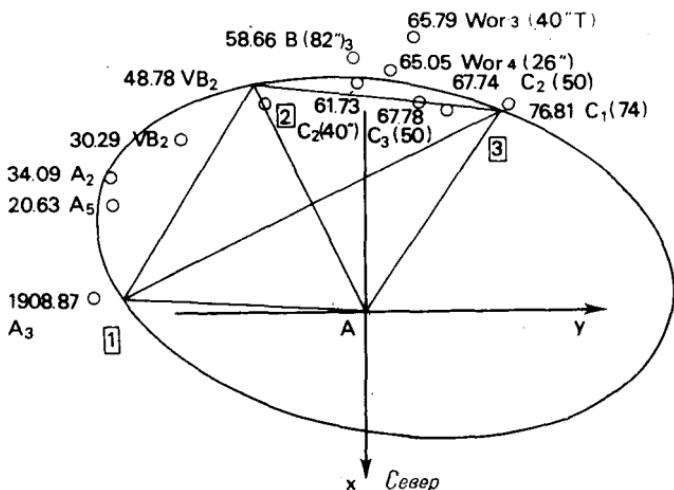


Рис. 6.6. Иллюстрация метода Тиля—Иннеса—ван ден Боса. Приведены данные для двойной звезды ADS 1227 = A 1913. Нанесены результаты наблюдений, а также сокращенное имя наблюдателя, число ночных, отверстие инструмента в дюймах (") или в сантиметрах. Видимый эллипс проведен по трем средним местам.

Преодолев трудности, связанные с аппроксимацией участка 1920—1948 гг., получим эллипс, параметры которого приведены в нижеследующей таблице:

t	Δt	ΔS	$c = \Delta S / \Delta t$	c
1908,87	11,81	0,212	0,0180	
1920,68	28,10	0,483	0,0172	0,0174
1948,78	19,00	0,335	0,0176	
1967,78	9,03	0,164	0,0182	
1976,81				0,0178

Принимая во внимание неточность наблюдений и их немногочисленность, можно считать эту таблицу удовлетворительной. Отсюда выводим $c = 0,01757$. Измеряем площадь эллипса и получаем период $P = S/c = 2,7607/c = 157,1$.

Выберем нормальные места. Возьмем крайние наблюдения и наблюдение 1948 г.:

$$\begin{aligned}t_1 &= 1908,87, \quad \rho_1 = 0,22'', \quad \theta_1 = 267,0^\circ, \\t_2 &= 1948,78, \quad \rho_2 = 0,18'', \quad \theta_2 = 205,8^\circ, \\t_3 &= 1976,81, \quad \rho_3 = 0,20'', \quad \theta_3 = 144,6^\circ.\end{aligned}$$

Находим по графику

$$2\pi S_{12}/S = 1,04397,$$

$$2\pi S_{32}/S = 1,01962,$$

$$2\pi S_{31}/S = 0,97114,$$

Отсюда получаем

$$\alpha - \sin \alpha = 0,55203,$$

$$\beta - \sin \beta = 0,10130,$$

$$\alpha + \beta - \sin(\alpha + \beta) = 1,74578,$$

$$\left. \begin{array}{l} \alpha = 88,91^\circ, \\ \beta = 49,13^\circ, \end{array} \right\} \alpha + \beta = 138,04^\circ,$$

$$\alpha + \beta = 138,21^\circ.$$

Выбираем

$$\alpha = 89,0^\circ = u_2 - u_1,$$

$$\beta = 49,2^\circ = u_3 - u_2,$$

$$\alpha + \beta = 138,2^\circ = u_3 - u_1.$$

Затем находим

$$e \sin u_2 = +0,20979,$$

$$e \cos u_2 = -0,24825,$$

что дает $u_2 = 139,8^\circ$, $e = 0,32$, $u_1 = 50,8^\circ$, $u_3 = 189,0^\circ$. Эти три значения u позволяют вычислить средние аномалии:

$$M_1 = u_1 - e \sin u_1 = 0,63862 \text{ рад},$$

$$M_2 = u_2 - e \sin u_2 = 2,2342 \text{ рад},$$

$$M_3 = u_3 - e \sin u_3 = 3,34673 \text{ рад},$$

откуда получаем эпоху прохождения через перигастр:

$$T = t_1 - M_1/\mu = 1892,90,$$

$$T = t_2 - M_2/\mu = 1892,99,$$

$$T = t_3 - M_3/\mu = 1893,07.$$

Округляем до значения $T = 1893,0$ или $T + P = 2050,1$.

Остается вычислить константы A , B , F , G . Имеем

$$x_1 = -0,01005'' \quad y_1 = -0,19174''$$

$$x_2 = -0,18006'' \quad y_2 = -0,08705''$$

$$x_3 = -0,15677'' \quad y_3 = +0,10734''$$

$$X_1 = +0,31203 \quad Y_1 = +0,73420$$

$$X_2 = -1,08380 \quad Y_2 = +0,61151$$

$$X_3 = -1,30769 \quad Y_3 = -0,14821.$$

Решение уравнений

$$x_i = AX_i + FY_i, \quad y_i = BX_i + GY_i$$

для $i = 1, 3$ и $i = 1, 2$ дает соответственно

$$A = +0,1276'' \quad A = +0,1276''$$

$$B = -0,0551'' \quad B = -0,0549''$$

$$F = -0,0679'' \quad F = -0,0683''$$

$$G = -0,2377'' \quad G = -0,2397''.$$

Принимаем

$$A = +0,1276'', \quad B = -0,0550'',$$

$$F = -0,0681'', \quad G = -0,2387'',$$

откуда по формулам (6.14) находим элементы Кэмбелла.

Таким образом, имеем следующий набор элементов орбиты:

$$P = 157,1 \text{ года}$$

$$n = 2,29153^\circ, \quad A = +0,1276'',$$

$$T = 2050,1 \quad B = -0,0550'',$$

$$a = 0,25'', \quad F = -0,0681'',$$

$$e = 0,32, \quad G = -0,2387''. \quad$$

$$i = 123,4^\circ$$

$$\Omega = 77,4^\circ,$$

$$\omega = 95,9^\circ,$$

Следующая таблица дает разности «Наблюденное минус вычисленное значение» ($O - C$), называемые невязками, в ней приведены также даты, наблюдения и наблюдатели.

t	θ	ρ	Наблюдатель и число наблюдений	$O - C$	
1908,87	267,0°	0,22''	Эйткен (3)	-0,2°	+0,03''
1920,68	247,0	0,22	Эйткен (5)	-1,2	-0,01
1930,29	237,5	0,20	ван Бисбрурк (2)	+2,4	-0,03
1934,09	242,9	0,23	Эйткен (2)	+13,2	0,00
1948,78	205,8	0,18	ван Бисбрурк (2)	-0,1	-0,02
1958,66	182,3	0,20	ван ден Бос (3)	-3,5	+0,02
1961,73	181,5	0,18	Куто (2)	+2,5	0,00
1965,051	173,6	0,19	Уорли (4)	+2,2	+0,01
1965,794	170,0	0,22	Уорли (3)	+0,2	+0,04
1967,78	165,2	0,17	Куто (3)	0,0	-0,01
1969,74	157,7	0,17	Куто (2)	-3,1	-0,01
1976,81	144,6	0,20	Куто (1)	-0,9	+0,01

За исключением наблюдения 1934 г., наблюдения довольно точны. Этот расчет основан на использовании слишком короткого отрезка орбиты, чтобы получить надежные элементы. Такую орбиту называют предварительной. Эфемериды, приведенные ниже, позволят в будущем проверить правильность результатов:

1978,0	143,1°	0,19"
1980,0	139,1	0,20
1982,0	135,3	0,20
1984,0	131,7	0,20.

Метод противоположных точек Данжона. Этот метод детально описан в *Bulletin Astronomique*, XI, 1938, а также в *Annales de l'observatoire de Strasbourg*, V, 1956.

Это аналитический метод, не требующий построения видимого эллипса, за исключением некоторых случаев, когда нужно определить точное значение периода. Его применяют к изучению двойных звезд, в которых спутник совершил по крайней мере один полный оборот; он позволяет получить очень надежные элементы, так как их определение основано на использовании всех наблюдений, что обеспечивает строгий контроль результатов. Этот метод допускает много последовательных приближений, постепенно сходящихся.

Вычислитель, как это ни удивительно, часто достигает окончательного результата, очень близкого к истине, путем непосредственного использования измерений, избегая таким образом дифференциальных поправок элементов, что порой связано с выполнением длинных и утомительных вычислений. Метод противоположных точек разработан сравнительно недавно. Он наиболее употребителен после метода Тиля—Иннеса—ван ден Боса, который требует предельной тщательности, как и все методы, основанные на построении видимой орбиты.

Противоположными точками называются наблюдения, позиционные углы которых различаются на 180° . Отсюда следует, что истинные аномалии также отличаются на 180° . Это свойство, не зависящее от наклонения орбиты, как и закон площадей, но специфическое для кеплеровского движения, чего не скажешь о законе площадей.

Метод состоит из двух частей. Сначала вычисляются динамические элементы, затем константы Тиля—Иннеса.

Для всех пар противоположных точек фундаментальное уравнение Тиля (6.28) упрощается, так как площадь S_{12} равна нулю, и мы имеем

$$M_2 - M_1 = u_2 - u_1 - \sin(u_2 - u_1). \quad (6.34)$$

Итак, $v_2 - v_1 = 180^\circ$ и $\theta_2 - \theta_1 = 180^\circ$, но $M_2 - M_1 \neq 180^\circ$ и $u_2 - u_1 \neq 180^\circ$. Подставим

$$M_2 - M_1 = 180^\circ - \Delta,$$

или

$$\Delta = 180^\circ - n(t_2 - t_1). \quad (6.35)$$

Величину Δ Данжон назвал характеристическим углом. Можно также записать

$$\Delta = (v_2 - M_2) - (v_1 - M_1). \quad (6.36)$$

Видно, что Δ — алгебраическая разность уравнений центра для двух противоположных точек. Этот угол стремится к нулю в периастре и апоастре. Он отрицателен между апоастром и периастром и положителен в других положениях.

Покажем, что Δ есть функция M_1 (или M_2) и эксцентриситета:

$$\operatorname{tg}(v/2) = [(1+e)/(1-e)]^{1/2} \operatorname{tg}(u/2),$$

что приводит для двух противоположных точек орбиты к выражению

$$\operatorname{tg}(u_2/2) = -(1-e)/(1+e) \operatorname{ctg}(u_1/2),$$

$$\operatorname{tg}[(u_2 - u_1)/2] = -(1 - e \cos u_1)/(e \sin u_1) = -(1 - e^2)^{1/2}/(e \sin v_1),$$

поскольку v_1 есть функция M_1 (или M_2) и e , это показывает, что Δ также есть функция от M_1 (или M_2) и e .

Таблицы с двумя входами, дающие M как функцию Δ и e , были вычислены Мюллером. Эти таблицы опубликованы в *Annales de l'observatoire de Strasbourg* и мало распространены за пределами обсерваторий. Мы приведем здесь отрывок, позволяющий применять этот метод путем удобной интерполяции с разумно выбранным шагом. Данжон изучил свойства кривых $\Delta(M)$ при постоянном значении эксцентриситета e ; он заметил, что максимум Δ имеет место для $v_1 = 90^\circ$. Тогда

$$M_1 = \arccos e - e(1 - e^2)^{1/2}, \quad \Delta_{\max} = 180^\circ - 2M_1.$$

Таблица дает среднюю аномалию M в градусах для различных фиксированных e и Δ вплоть до ее максимальных значений. Аномалию точек, расположенных симметрично относительно максимума, находим по формуле

$$M'_1 = 180^\circ - M_1 - \Delta.$$

Фрагмент таблицы Мюллера

Δ	e		e		e		e	
	$0,1$	$0,2$	$0,3$	$0,4$	$0,5$	$0,6$	$0,7$	$0,8$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2,03	0,80	3	1,23	0,67	4	0,50	0,27
2	4,06	1,60	6	2,46	1,35	8	1,00	0,53
3	6,10	2,40	9	3,69	2,03	12	1,51	0,80
4	8,15	3,21	12	4,94	2,71	16	2,02	1,07
5	10,22	4,01	15	6,21	3,40	20	2,53	1,35
6	12,32	4,82	18	7,50	4,10	24	3,05	1,62
7	14,45	5,63	21	8,81	4,81	28	3,58	1,90
8	16,62	6,45	24	10,16	5,53	32	4,12	2,19
9	18,84	7,27	27	11,55	6,26	36	4,68	2,47
10	21,11	8,09	30	12,98	7,00	40	5,25	2,77
11	23,44	8,93	33	14,47	7,64	44	5,84	3,07
12	25,85	9,76	36	16,04	8,55	48	6,44	3,38
13	28,35	10,61	39	17,67	9,35	52	7,08	3,71
14	30,96	11,46	42	19,40	10,19	56	7,74	4,04
15	33,70	12,33	45	21,26	11,05	60	8,44	4,38
16	36,61	13,20	48	23,29	11,95	64	9,17	4,74
17	39,73	14,08	51	25,48	12,89	68	9,95	5,11
18	43,11	14,98	54	27,96	13,87	72	10,79	5,50
19	46,86	15,88	56	29,80	14,57	76	11,70	5,91

20	51,14	16,81	58	31,84	15,28	80	12,69	6,35	138	9,15	2,89	0,59
21	56,28	17,74	60	34,17	16,03	84	13,80	6,82	140	9,88	3,02	0,60
22	63,18	18,70	61	35,46	16,41	88	15,03	7,32	142	10,84	3,16	0,62
23		19,67	62	36,89	16,81	92	16,46	7,87	143	11,46	3,24	0,64
24		20,66	63	38,48	17,22	96	18,16	8,47	144	12,24	3,32	0,65
25		21,68	64	40,30	17,63	100	20,29	9,14	145	13,34	3,41	0,66
26		22,71	65	42,40	18,06	102	21,60	9,50	146	15,62	3,50	0,68
27		23,78	66	45,04	18,50	104	23,18	9,89	148		3,70	0,71
28		24,87	67	48,87	18,95	105	24,12	10,09	150		3,94	0,73
29		26,00	68		19,42	106	25,21	10,30	152		4,23	0,77
30		27,16	70		20,40	107	26,51	10,52	154		4,58	0,81
31		28,36	72		21,46	108	28,25	10,75	155		4,79	0,83
32		29,61	74		22,60	109	30,68	10,99	156		5,04	0,85
33		30,90	76		23,86	110		11,23	157		5,33	0,88
34		32,26	78		25,25	112		11,76	158		5,69	0,90
35		33,68	80		26,82	114		12,35	159		6,14	0,93
36		35,17	81		27,69	116		13,00	160		6,80	0,96
37		36,76	82		28,64	118		13,74	161		8,06	0,99
38		38,45	83		29,67	120		14,60	163			1,07
39		40,28	84		30,82	122		15,64	165			1,16
40		42,27	85		32,13	123		16,23	167			1,29
41		44,47	86		33,64	124		16,92	169			1,46
42		46,97	87		35,49	125		17,71	170			1,60
43		49,91	88		37,95	126		18,67	171			1,78
44		53,58	89		42,47	127		19,90	172			2,05
45		59,04	90			128		21,71	173			2,64

Эти несколько замечаний позволяют решить нашу задачу. Предположим, что мы хотим вычислить элементы двойной, совершившей по крайней мере один полностью наблюдавшийся оборот. Определяем период, затем, после приведения всех наблюдений к одному обороту, строим кривую $\theta(t)$. Эта кривая должна быть построена в большом масштабе. Данжон рекомендует следующий масштаб: год соответствует нескольким сантиметрам, а градус некоторым миллиметрам. Затем записываем все отдельные наблюдения. Результаты вычислений позволяют, если это необходимо, исправить кривую.

Обозначим каждую пару противоположных точек индексами 1 и 2 и составим таблицу серии пар, например $(0, 180^\circ)$, $(10^\circ, 190^\circ)$, ..., $(170^\circ, 350^\circ)$, выпишем эпохи t_1, t_2 , затем $m_1 = nt_1$, $m_2 = nt_2$ и Δ . Максимум Δ дает приближенное значение эксцентричеситета. Его используют, чтобы найти M_1 с помощью таблиц, что определяет T . В самом деле,

$$m_1 - M_1 = nt_1 - n(t_1 - T) = nT.$$

Разности $m_1 - M_1$ (или $m_2 - M_2$) для каждой пары точек должны быть постоянными. Если это условие не выполняется, то путем интерполяции нужно выбрать немного отличающийся эксцентричеситет так, чтобы разности $m_1 - M_1$ не давали систематических уклонений. Это позволяет найти одновременно e и T .

Определив таким образом эти два элемента, вычисляем

$$M_1 = m_1 - nT, \quad M_2 = m_2 - nT,$$

откуда по таблицам кеплеровского движения находим v_1 и v_2 . Разности $v_2 - v_1$ должны быть близкими к 180° , в противном случае нужно уточнить кривую $\theta(t)$. Полученные таким образом истинные аномалии называются наблюденными, их обозначают через v_0 .

Сравним их с истинными аномалиями v_c , вычисленными с использованием основных уравнений. Для этого Данжон вывел из соотношений (6.6) и (6.12)

$$ap \cos \theta = r(A \cos v + F \sin v),$$

$$ap \sin \theta = r(B \cos v + G \sin v),$$

затем он исключил a , ρ и r и нашел

$$\operatorname{tg} \theta = (B + G \operatorname{tg} v) / (A + F \operatorname{tg} v). \quad (6.37)$$

Используя пары (v_0, θ) , можно записать столько уравнений этого типа, сколько выбрано точек, но они позволяют определить только три константы в функции другой константы. Подстановкой $A = \alpha F$, $B = \beta F$, $G = \gamma F$ уравнение преобразуется к виду

$$\operatorname{tg} \theta = (\beta + \gamma \operatorname{tg} v) / (\alpha + \operatorname{tg} v). \quad (6.38)$$

Из полученных уравнений методом наименьших квадратов находим величины α , β , γ . Но Морель отметил, что выбор делителя в формуле (6.37) не должен быть произвольным. Предпочтительнее в качестве делителя выбирать наибольшую константу из A , B , F , G и выражать все остальные константы через нее. Поскольку значения константы заранее не известны, выбор ее зависит от каждого конкретного случая, приходится главным образом избегать тех значений, которые слишком отличаются от других, отбрасывать эти значения и снова решать систему (6.38).

Зная константы α , β , γ , можно определить вычисленные истинные аномалии по формуле (6.38). По аномалиям v_c находим средние вычисленные аномалии M_c . Составляем невязки $v_0 - v_c$, затем $M_c - M = \delta M$, которые после преобразования дают $\delta t = -(1/n) \delta M$. Это поправки, которые нужно внести в кривую $\theta(t)$.

Нужно добиться, чтобы δt не были значительными и не меняли ход кривой. Это обеспечивает контроль вычислений. Если величины δt слишком велики, нужно уточнить кривую $\theta(t)$ в следующем приближении и начать все вычисления сначала. Как правило, двух приближений бывает достаточно.

Снова вычисляем по формуле (6.38) с помощью найденных констант позиционные углы для наблюдаемых эпох. Ход невязок покажет степень надежности элементов.

Остается определить последнюю константу. Мы поступим следующим образом. Три константы Тиля—Иннеса как функции четвертой константы позволяют вычислить геометрические элементы i , Ω , ω с помощью первых трех соотношений (6.14). В предположении, что большая полуось равна единице, вычисляем угловые расстояния и строим диаграмму $(\rho_c/a, \rho_0)$. Представленные таким образом точки распределяются вдоль прямой с наклоном, определяющим величину a . Таким образом, все элементы найдены.

Заметим, что в принципе для определения большой полуоси достаточно единственного наблюдения разделения. Таким образом, большое преимущество метода Данжона состоит в том, что при этом элементы определяются только с помощью позиционных углов, измеряемых гораздо точнее, чем разделения, которые служат лишь для того, чтобы найти масштаб орбиты. Для этой цели достаточно использовать наибольшие разделения, точнее всего измеренные.

Пример. ADS 10786 = AC 7, звездные величины 10,5 и 11,0^m. $\alpha = 17^h 44^m 05^s$, $\delta = +27^\circ 45'$ (1950).

Орбита этой двойной звезды была вычислена автором в 1959 г. Элементы хорошо представляют последующие наблюдения. Мы

здесь воспроизведем последовательность операций при вычислениях.

Эта пара красных карликов завершает свой третий оборот по орбите с момента ее открытия Кларком в 1856 г. Хотя пара слабая, она регулярно наблюдалась, и первая орбита была рассчитана в 1878 г. Метод противоположных точек к ней особенно подходит, так как из-за слабого блеска компонентов измерения разделения трудны и неточны, в то же время относительно большое разделение компонентов позволяет достаточно уверенно измерять позиционный угол.

Частично измерения этой пары приведены ниже.

Определив период, равный 43,20 года, мы привели все наблюдения к эпохе 1950 г. и к одному обороту, затем построили кривую $\theta(t)$ в масштабе 5 мм = 1° , 5 см = 1 год. Затем для 36 значений позиционных углов через каждые 10° нашли характеристические углы

$$\Delta = (v_2 - M_2) - (v_1 - M_1) = 180^\circ - n(t_2 - t_1),$$

где t_1 и t_2 — эпохи прохождения через две противоположные точки. За начало отсчета принята эпоха 1889,0. Строим таблицу, дающую позиционный угол через каждые 10° от 0 до 170° , эпохи t_1 и t_2 , соответствующие величинам θ и $\theta + 180^\circ$, аномалии $nt_1 = m_1$, $nt_2 = m_2$ и характеристический угол. Эта колонка и колонка t_2 показывают, что периастр заключен между эпохами 31,68 и 33,43. С другой стороны, максимум Δ показывает, что эксцентриситет близок к 0,18. Берем для $e = 0,18$ и 0,19 значения M из таблиц Мюллера, затем определяем разности $m_2 - M = m_0$. Они обнаруживают систематический ход для $e = 0,19$. Вычисляем для m_0 среднее предварительное значение $276,3^\circ$ и выбираем значение $e = 0,18$. Вычисляем величины $M_{12} = m_{12} - 276,3^\circ$ для 36 значений θ . Это наблюденные средние аномалии. Отсюда выводим наблюдаемые средние аномалии с помощью таблицы кеплеровского движения. Замечаем, что разности $v_2 - v_1 = 180^\circ$, которые теоретически должны быть равны нулю, остаются малыми, две трети из них меньше 1° . С помощью наибольших невязок исправляем соответствующие аномалии M_{12} , которые в свою очередь определяют улучшенные значения для m_0 ; это значение становится равным $276,66^\circ$ (откуда получаем $T = 1922,20$); уточченное значение e приближается к 0,178. По таблице кеплеровского движения снова находим наблюденные истинные аномалии v_0 , которые приведены в следующей таблице.

Теперь можно записать 36 уравнений (6.38), взяв θ и v_0 из таблицы. Поскольку разности малы, складываем уравнения по три и решаем методом наименьших квадратов. Можно было бы ограничиться сложением их по 12, что при экономии времени

θ	t_1	t_2	m_1	m_2		$e = 0,18$		$e = 0,19$	
						M	m_0	M	m_0
0°	0°,64	26°,88	5°3	224°,0	- 38°,7	- 51°,8	275°,8	- 44°,8	268°,8
10	1°,43	27°,44	11°,9	228°,7	- 36°,8	- 46°,0	274°,7	- 40°,6	269°,3
20	2°,41	28°,15	20°,1	234°,6	- 34°,5	- 40°,7	275°,3	- 36°,4	271°,0
30	3°,67	29°,07	30°,6	242°,2	- 31°,6	- 35°,3	277°,5	- 32°,0	274°,2
40	5°,53	30°,20	46°,1	251°,7	- 25°,6	- 26°,6	278°,3	- 24°,8	276°,9
50	8°,54	31°,68	71°,2	264°,0	- 12°,8	- 12°,2	276°,2	- 11°,3	275°,3
60	12°,43	33°,43	103°,6	278°,7	+ 4°,9	+ 4°,6	274°,1	+ 4°,9	273°,0
70	16°,18	35°,54	134°,8	296°,2	18°,6	18°,3	277°,9	16°,8	279°,4
80	19°,12	37°,22	159°,3	310°,2	29°,1	31°,4	278°,8	27°,5	283°,5
90	21°,07	38°,50	175°,6	320°,8	34°,8	41°,3	279°,5	36°,3	284°,9
100	22°,39	39°,39	186°,6	328°,2	38°,4	50°,8	277°,4		
110	23°,28	40°,14	194°,0	334°,5	39°,5	55°,2	279°,3		
120	24°,00	40°,79	200°,0	339°,9	40°,1				
130	24°,58	41°,24	204°,8	343°,7	41°,1				
140	25°,09	41°,72	209°,1	347°,7	41°,4				
150	25°,49	42°,23	212°,4	351°,9	40°,5				
160	25°,88	42°,73	215°,7	356°,1	39°,6	84°,8	271°,3		
170	26°,35	0°,07	219°,6	0°,6	39°,0	88°,1	272°,5		

θ	v_o	v_c	$v_o - v_c$	θ	v_o	v_c	$v_o - v_c$
0°	- 71°,4	- 71°,3	- 0°,1	180°	108°,6	108°,7	- 0°,1
10	- 65 ,7	- 65 ,8	+ 0 ,1	190	114 ,6	114 ,2	+ 0 ,4
20	- 58 ,4	- 58 ,9	+ 0 ,5	200	121 ,8	121 ,1	+ 0 ,7
30	- 48 ,6	- 49 ,9	+ 1 ,3	210	130 ,7	130 ,1	+ 0 ,6
40	- 36 ,0	- 37 ,2	+ 1 ,2	220	142 ,9	142 ,8	+ 0 ,1
50	- 18 ,6	- 19 ,2	+ 0 ,6	230	161 ,6	161 ,4	+ 0 ,2
60	+ 2 ,7	+ 4 ,2	- 1 ,5	240	- 175 ,2	- 175 ,8	+ 0 ,6
70	27 ,8	28 ,1	- 0 ,3	250	- 152 ,6	- 151 ,9	- 0 ,7
80	47 ,0	46 ,9	+ 0 ,1	260	- 133 ,6	- 133 ,1	- 0 ,5
90	60 ,5	60 ,2	+ 0 ,3	270	- 120 ,1	- 119 ,8	- 0 ,3
100	69 ,5	69 ,7	- 0 ,2	280	- 110 ,2	- 110 ,3	+ 0 ,1
110	76 ,9	76 ,8	+ 0 ,1	290	- 103 ,3	- 103 ,2	- 0 ,1
120	82 ,9	82 ,5	+ 0 ,4	300	- 97 ,4	- 97 ,5	+ 0 ,1
130	87 ,0	87 ,3	- 0 ,3	310	- 92 ,5	- 92 ,7	+ 0 ,2
140	91 ,2	91 ,6	- 0 ,4	320	- 88 ,0	- 88 ,4	+ 0 ,4
150	95 ,5	95 ,6	- 0 ,1	330	- 84 ,5	- 84 ,4	+ 0 ,1
160	99 ,7	99 ,7	0 ,0	340	- 80 ,8	- 80 ,3	- 0 ,5
170	104 ,0	104 ,0	0 ,0	350	- 76 ,5	- 76 ,0	- 0 ,5

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОРБИТ И ЗВЕЗДНЫХ МАСС

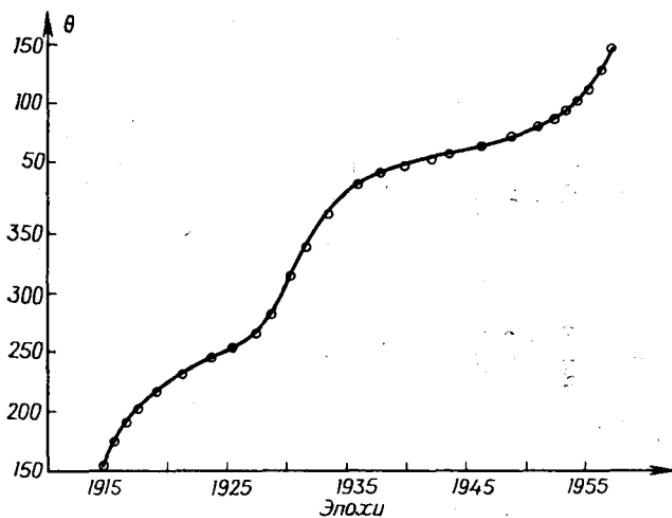


Рис. 6.7. ADS 10786. Кривая θ (t) спутника по отношению к главной звезде. Кружки представляют наблюдения, выполненные с 1915 по 1960 г. Рабочий график строится в масштабе 5 мм — 1° и 5 см — 1 год и его размеры 2 м \times 1,8 м. Части кривой с сильным наклоном соответствуют эпохам малого разделения.

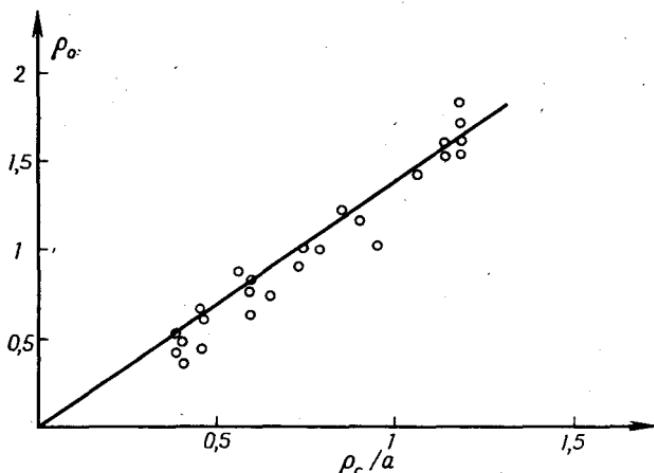


Рис. 6.8. Измерение большой оси ADS 10786 = АС 7. По оси абсцисс отложены вычисленные величины ρ_0/a , по оси ординат — измеренные разделения ρ_0 . Точки ложатся около прямой, наклон которой определяет большую полуось. Нанесены лишь некоторые наблюдения.

дало бы почти такой же результат. Решение системы дает следующие значения констант: $\alpha = 1,749$, $\beta = -2,831$, $\gamma = -0,957$. Истинные аномалии, вычисленные с помощью этих констант, v_c приведены в таблице, где также даны разности $v_0 - v_c$. Эти разности малы, они приводят к небольшим поправкам порядка нескольких сотых градуса в год к эпохам t_1 и t_2 . Убеждаемся, что кривая $\theta(t)$, исправленная с учетом этих поправок, меняется мало, за исключением, быть может, окрестности позиционного угла 250° , но кривая в целом хорошо аппроксимирует наблюдения.

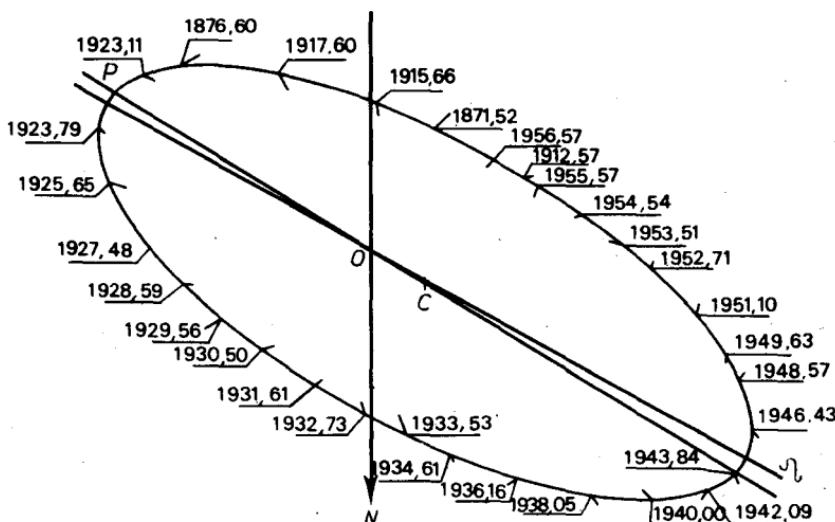


Рис. 6.9. Видимая орбита ADS 10786 = AC 7. Нанесены не все наблюдения. Главная звезда расположена в точке O . Максимальное угловое расстояние спутника в 1944 и 1987 гг. составляет $1,65''$. Напомним, что $1''$ — это угол, под которым 1 см виден с расстояния 2 км. Отрезки прямых соответствуют невязкам между наблюденными и вычислennыми положениями звезды.

Тогда геометрические элементы получаются из классических формул: $i = 66,2^\circ$, $\varpi = 60,7^\circ$, $\omega = 174,0^\circ$.

Остается определить большую ось. Поскольку наблюдения довольно разбросаны и выполнены с сильно различающимися инструментами, нужно снова убедиться в отсутствии систематических уклонений данных одного наблюдателя от другого или уклонений в пределах данных одного наблюдателя в функции, описывающей разделение компонентов.

Строим с помощью набора измерений диаграмму $(\rho_c/a, \rho_0)$. Измерения располагаются около прямой, пересекающей ось

ρ_c/a вблизи начала координат (рис. 6.8). В противоположность тому, что обычно имеет место для ярких пар, наблюдатели измеряли эту пару слишком часто в моменты, когда разделение компонентов было мало, что могло бы остаться незамеченным при вычислении элементов, основываясь на видимом эллипсе. Наконец, опираясь на измерения, выполненные в эпохи большого разделения компонентов, мы определили большую полуось орбиты $a = 1,360''$, что позволило вычислить константы A, B, F, G . Заметим, что выбранный делитель F не является наименьшим из четырех возможных.

Элементы

$P = 43,20$ года	$a = 1,360''$	$A = -0,7118''$
$n = 8,3333^\circ$	$i = 66,2^\circ$	$B = -1,1522$
$T = 1965,40$	$\Omega = 60,7^\circ$	$F = +0,4070$
$e = 0,178$	$\omega = 174,0^\circ$	$G = -0,3895$

Эфемериды

1976,5	6,6°	0,68"	1980,5	38,2°	1,15"
1977,5	18,1	0,79	1981,5	42,4	1,26
1978,5	26,8	0,92	1982,5	46,0	1,36
1979,5	33,2	1,04	1983,5	49,1	1,44

Ниже мы приводим серию наблюдений и их невязок по отношению к орбите. Чтобы не перегружать текст, мы приводим их лишь частично. В случаях когда средние значения вычислены по данным более чем двух наблюдателей, мы отмечаем только число ночных.

Дифференциальные поправки элементов. Если вычисление орбиты выполнено хорошо, то сразу же должны получиться приемлемые невязки. В противном случае тщетно надеяться на общее удовлетворительное улучшение элементов. Возможно, что наблюдения отягощены систематическими ошибками или существует невидимое третье тело, которое возмущает движение компонентов пары. Ход и величины невязок зависят от трудности наблюдения данной двойной. Ошибка 10° для тесной пары с разделением $0,2''$ менее существенна, чем ошибка 2° для Кастро или γ Девы. Именно поэтому вычисления орбит должны производиться только наблюдателями визуально-двойных, хорошо представляющими себе трудности измерений.

Эпоха	Наблюдения		Число наблюдений	Наблюдатель	Невязки	
	θ	ρ			θ	ρ
1857,50	59,2°	1,82"	2	Дос	+0,4°	+0,22"
1865,79	84,1	1,17	7	Дембовский (5), Струве (2)	-0,2	+0,06
1878,08	233,5	1,03	13		-0,2	-0,05
1885,56	286,7	0,67	5	Струве (2), Холл (3)	+1,8	0,00
1894,74	41,4	1,23	30		+0,3	+0,01
1902,94	63,6	1,63	32		-0,3	+0,05
1906,28	73,0	1,37	18		0,0	-0,02
1908,46	80,1	1,22	22		-1,0	+0,05
1911,59	102,4	0,72	8		+0,3	-0,05
1915,66	175,4	0,49	7		-0,5	-0,06
1921,11	233,0	1,00	14		+0,4	-0,07
1928,59	283,3	0,66	3	Эйткен	+1,0	-0,03
1933,53	8,7	0,64	7		-0,6	-0,06
1940,00	47,6	1,37	36		-0,3	-0,05
1946,43	63,7	1,60	26		-0,6	+0,03
1951,10	79,5	1,26	8	Бэз (4)	+1,1	+0,03
1954,54	99,9	0,77	7	Куто (3), Бэз (4)	+0,4	-0,03
1956,57	126,8	0,55	9	Уорли (4), Бэз (5)	+0,1	-0,03
1960,65	204,0	0,70	4	Уорли	+2,8	+0,10
1964,68	234,2	1,07	4	Бэз	0,0	-0,01
1974,54	330,8	0,51	7		-1,2	-0,02

Особенно существенны уклонения в θ , и в некоторых условиях они могут быть рассмотрены как дифференциалы; уклонения в разделениях могут быть систематическими, незначимыми, и их редко можно рассматривать как дифференциалы. Таким образом,

$$\theta = f(\vartheta, i, \omega, e, T, n).$$

Полный дифференциал запишется в виде

$$d\theta = \sum_{i=1}^6 \frac{\partial f}{\partial x_i} dx_i, \quad (6.39)$$

где x_i — один из шести элементов; отсюда

$$\theta_o - \theta_e = Ad\vartheta + Bdi + Cd\omega + Dde + EdT + Fdn.$$

С помощью соотношений (6.4) и (6.9) легко вычислить величины A, \dots, F . Находим

$$A = 1,$$

$$B = -\sin i \operatorname{tg}(v + \omega) \cos^2(\vartheta - \theta),$$

$$C = \cos^2(\theta - \vartheta) \sec^2(v + \omega) \cos i,$$

$$D = C (2 - e \cos u - e^2) \sin u / (1 - e \cos u)^2,$$

$$E = C (1 - e^2)^{1/2} / (1 - e \cos u)^2,$$

$$F = E(t - T).$$

Каждое наблюдение дает уравнение (6.39). Система уравнений решается методом наименьших квадратов. Это трудная процедура и, по правде говоря, мало употребительная. Гораздо быстрее можно исправить элементы, проанализировав ход невязок.

Действительно, изменение в Δ меняет одинаковым образом все позиционные углы. Удобно записать

$$dM = (t - T) dn - ndT.$$

В этом случае можно изменить величины n и T , чтобы улучшить две области невязок. Чем больше эксцентриситет, тем более существенно изменение в значении T .

Вычисление масс звезд

С помощью третьего закона Кеплера непосредственно определяем общую массу системы:

$$M_A + M_B = a''^3 / (p^3 P^2), \quad (6.40)$$

где M_A и M_B — массы компонентов, масса Солнца принята за единицу, p — тригонометрический параллакс в секундах дуги, a'' — видимая большая полуось, выраженная в тех же единицах, P — период в годах.

Таким образом можно получить фундаментальные массы только по измерениям положений звезды. Плохое знание параллаксов ограничивает прогресс в этой области, поскольку малость параллакса не позволяет заметно повысить точность их измерений без глубокой революции в наших методах. Напомним, что параллакс — это угол, под которым со звезды видна астрономическая единица, или среднее расстояние между Землей и Солнцем. Большие оси орбит и периоды двойных звезд уточняются со временем, по мере накопления наблюдений. Поэтому из 750 пар с известными орбитами менее чем для 50 известен параллакс, достаточно хорошо измеренный, чтобы позволить определить массу.

Эти результаты позволяют заключить, что массы звезд заключены в пределах от 0,07 до 20 солнечных масс, 9/10 звезд имеют массы, лежащие между 0,4 и 2 солнечными; при этом Солнце занимает середину этого интервала.

Соотношение (6.40) позволяет найти полную массу системы, но не массы отдельных компонентов. Для определения этих масс нужно знать орбиту каждого компонента вокруг общего центра

масс системы. Задача определения индивидуальных орбит компонентов решается не визуально, а фотографически или спектрографически. Для полноты изложения опишем суть этой важной проблемы.

Отношение масс, получаемое из лучевых скоростей. Можно определить массы компонентов пары, измеряя для многих эпох лучевые скорости каждого компонента.

Мы будем придерживаться системы обозначений ван ден Боса (Методы астрономии.— М.: Мир, 1967). Пусть V_A и V_B —

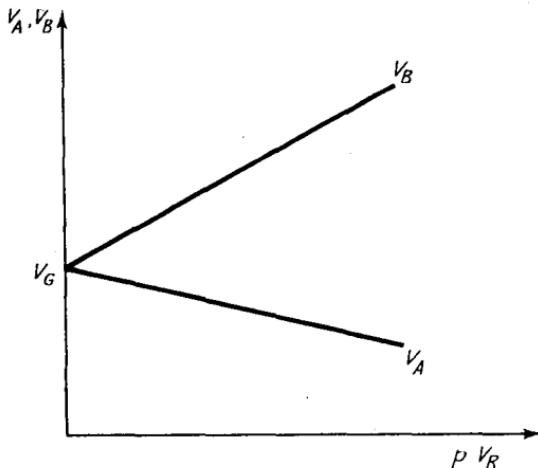


Рис. 6.10. Измерение отношения масс с использованием данных о лучевых скоростях.

лучевые скорости компонентов A и B и V_G — лучевая скорость центра масс. Положим

$$V_R = V_B - V_A, \quad \beta = M_B/M_A,$$

$$kp = \beta/(1 + \beta), \quad lp = 1/(1 + \beta),$$

где p — параллакс, l и k — константы.

Предположим для определенности, что скорость V_R положительна. Это означает, что компонент A удаляется. Тогда имеем

$$V_A = V_G - kpV_R, \quad V_B = V_G + lpV_R. \quad (6.41)$$

Итак, V_R известно как функция времени и элементов орбиты и определяется формулами (6.15) и (6.16).

В различные эпохи измеряют лучевые скорости и наносят на график, по оси абсцисс которого откладывают pV_R , а по оси ординат — скорости V_A и V_B . Согласно (6.41), при этом получаются два отрезка прямой, которые пересекаются в точке

$pV_R = 0$ с ординатой V_G (рис. 6.10). Таким образом определяется лучевая скорость центра масс. Отрезки прямых V_A и V_B имеют разные наклоны, их измерение дает величины k и l , откуда получаем отношение масс и параллакс:

$$M_B/M_A = k/l, \quad p = 1/(k+1). \quad (6.42)$$

Если тригонометрический параллакс уже известен из астрономических наблюдений, то он служит для контроля вычисления орбиты.

Если нельзя измерить независимо V_A и V_B , а только V_R , получается абсолютный параллакс и сумма масс, но массы отдельных звезд остаются неизвестными.

Определение звездных масс по измерениям лучевых скоростей ограничено точностью спектрографов. Отрезки прямых на рис. 6.10 тем короче, чем меньше изменения лучевых скоростей. Их наклон не всегда легко измерить. Кроме того, этот метод может применяться только к хорошо разделенным (по крайней мере на $2''$) двойным звездам, а также достаточно ярким, например не слабее $6''$. Отсюда следует, что он применим только к немногим парам, таким, как γ Девы, α Центавра, 70 Змееносца, ζ Большой Медведицы. Тем не менее методы современной электронной спектрографии позволяют увеличить проникающую и разрешающую способность при измерении лучевых скоростей.

Определение отношения масс из фотографических наблюдений. Фотографирование двойных звезд с длиннофокусными инструментами позволяет проводить измерения положений компонентов по отношению к соседним звездам. Накопление достаточного числа фотографий в некоторых случаях позволяет разобраться в сложной картине видимого движения компонентов. Кроме того, число пар, подходящих для этого метода, весьма значительно.

Вообще говоря, компоненты двойной звезды разделяются на пластинке, если расстояние между ними превышает $1,5''$. Это связано с тем, что фотографические изображения сильно превышают размеры дифракционного диска, налагаясь друг на друга. Максимум фотографической интенсивности, или фоточентр, не соответствует положению ни первичного, ни вторичного компонентов. Пусть (рис. 6.11) A и B — положения компонентов, G — положение центра масс и P — положение фоточентра. Эти четыре точки лежат на одной прямой. Некоторые авторы, например ван де Камп, определяют положение фоточентра соотношением

$$AP/AB = \gamma = l_B/(l_A + l_B) = 1/(1 + 10^{0.4\Delta m}), \quad (6.43)$$

где l_A и l_B — светимости компонентов и Δm — разность их звездных величин.

Уравнение (6.43) не является строгим. Его обсуждали разные авторы, например Морель (1969), который разработал основы теории рассеяния света в фотопластинке. Эта проблема очень важна, поскольку она дает нам ключ к определению звездных

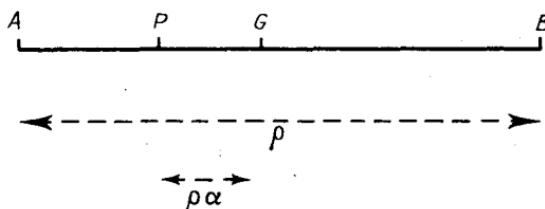


Рис. 6.11. Отношение масс, определяемое по положению фотоцентра.

масс. Результаты, полученные с использованием уравнения (6.43), и результаты Мореля, приведены в следующей таблице.

	Δm							
	0	0,5	1	2	3	4	5	
γ (ван де Камп)	0,5	0,387	0,285	0,137	0,060	0,025	0,01	
γ (Морель)	0,5	0,386	0,284	0,125	0,05	0,01	0	

Они заметно различаются при больших разностях блеска. Нужно заметить, что большая разность блеска соответствует звездам, принадлежащим к различным типам, которые по-разному экспонируют пластинку, что изменяет величину γ .

В ходе орбитального движения фотоцентр пары описывает орбиту, подобную орбите спутника, с отношением осей:

$$PG/AB = \alpha/a. \quad (6.44)$$

Итак, если записать отношение масс согласно ван де Кампу

$$R = AG/AB = M_B/(M_A + M_B), \quad (6.45)$$

имеем

$$R = (\alpha/a) + \gamma. \quad (6.46)$$

Измерение отношения масс компонентов, не разрешимых фотографически, упирается, следовательно, в определение величины α и зависит от предположений, сделанных относительно функции γ .

С учетом этого факта рассмотрим фотографию двойной звезды. Имеем два случая: компоненты разрешаются или компоненты не разрешаются.

В первом случае запишем прямоугольные координаты X и Y компонента A , ориентированные в направлении возрастания прямого восхождения и склонения соответственно:

$$\begin{aligned} X &= c_\alpha + \mu_\alpha (t - t_0) + pP_\alpha + a_\alpha RQ_\alpha, \\ Y &= c_\delta + \mu_\delta (t - t_0) + pP_\delta + a_\delta RQ_\delta, \end{aligned} \quad (6.47)$$

где c_α и c_δ — гелиоцентрические положения в начальную эпоху t_0 , μ_α и μ_δ — составляющие годичного собственного движения по прямому восхождению и склонению, t — эпоха, в которую был сделан снимок, P_α , P_δ — параллактические коэффициенты, или составляющие параллакса по прямому восхождению и по склонению, a_α , a_δ — составляющие большой оси, Q_α , Q_δ — составляющие орбитального движения по прямому восхождению и склонению в эпоху t .

Гелиоцентрические положения, собственные движения и параллакс являются постоянными величинами. Постоянными, однако, не являются ни параллактические коэффициенты, ни орбитальное движение.

Читателя, желающего детально изучить параллактические коэффициенты, мы отсылаем к специальным работам. Здесь мы лишь дадим формулы, позволяющие проводить вычисления,

$$P_\alpha = r (f \sin \odot + g \cos \odot), \quad P_\delta = r (f' \sin \odot + g' \cos \odot), \quad (6.48)$$

где r — радиус-вектор земной орбиты, выраженный в астрономических единицах и даваемый в Ежегодниках, \odot — истинная долгота Солнца, также приводимая в Ежегодниках, и

$$\begin{aligned} f &= 0,9174 \cos \alpha, \quad g = -\sin \alpha, \\ f' &= +0,3979 \cos \delta - 0,9174 \sin \alpha \sin \delta, \quad g' = -\cos \alpha \sin \delta. \end{aligned}$$

В эти константы входит наклон эклиптики к экватору, который медленно меняется. Эти формулы справедливы для 2000 г. Коэффициенты Q_α и Q_δ даются выражениями:

$$Q_\alpha = (AX + FY)/a, \quad Q_\delta = (BX + GY)/a.$$

Отметим, что X и Y в этих уравнениях являются приведенными координатами, определяемыми соотношениями (6.6).

Если видимая орбита известна, то уравнения (6.47) включают четыре неизвестных: гелиоцентрическое положение, составляющие собственного движения, параллакс и отношение масс.

В случае когда компоненты не разрешаются, на пластинке можно проследить только движение фотоцентра. Последние члены в правой части (6.47) равны

$$\alpha Q_\alpha = (R - \gamma) Q_\alpha, \quad \alpha Q_\delta = (R - \gamma) Q_\delta. \quad (6.49)$$

В этом случае коэффициент γ становится фундаментальным для измерения отношения масс, поскольку принимаются фотометрические гипотезы о связи фотоцентра с видимой орбитой компонентов. Вот почему так важно изучать функцию γ , зависящую от Δt и еще плохо известную.

Каждое наблюдение дает уравнение (6.47). Но нужно привести все пластиинки к одинаковым условиям, поскольку измеряемые величины не превосходят 2–3 мкм и могут маскироваться случайными ошибками. Причины этих ошибок многочисленны, отметим некоторые из них: рефракция; установка

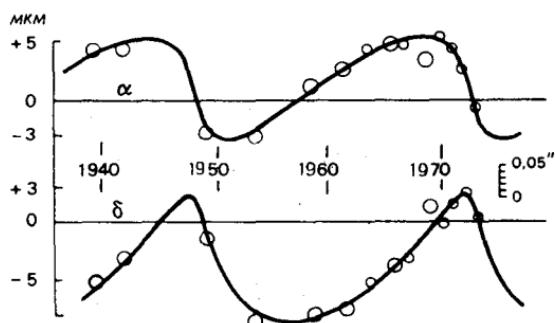


Рис. 6.12. Возмущенная траектория звезды, имеющей невидимый спутник. (Lippincott S. L. Astron J., с разрешения автора и издателя.) Звезда BD + 67°552. Движения по прямому восхождению и склонению отклоняются от прямолинейной траектории, что связано с присутствием невидимого спутника. Эти отклонения достигают 5 мкм в фокусе рефрактора обсерватории Спрул. Размеры кружков представляют вероятные ошибки наблюдений. Диаметр измеряемого фотографического изображения составляет около сотни микрометров. $P = 23,0$ года, $T = 1949,0$, $e = 0,73$.

пластиинки не в фокусе; неперпендикулярность плоскости пластиинки оптической оси телескопа; расширение, связанное с разностью температур. Обычно не стремятся исключить эти ошибки, но приводят все пластиинки к условиям одной из них, чтобы результаты были сравнимыми.

В окрестности изучаемого объекта выбирают несколько звезд, достаточно слабых, и формируют опорную группу, относительно которой будут проводиться измерения. Пусть X_{ci} , Y_{ci} — координаты опорных звезд на эталонной пластиинке. Все пластиинки нужно привести к ней.

Обозначим через x_i , y_i координаты опорных звезд на произвольной пластиинке. Они приводятся к эталонной пластиинке с помощью соотношений

$$X_{ci} = A_0 + A_1 x_i + A_2 y_i, \quad Y_{ci} = B_0 + B_1 x_i + B_2 y_i. \quad (6.50)$$

Ограничимся первым порядком малости; так как поле мало, всего несколько минут дуги, искажающие эффекты можно считать линейными с очень хорошей степенью точности. Вычислим A , B для каждой пластиинки методом наименьших квадратов и снова подставим эти константы в правые части выражений (6.50), чтобы получить координаты X_i , Y_i , приведенные к эталонной пластиинке.

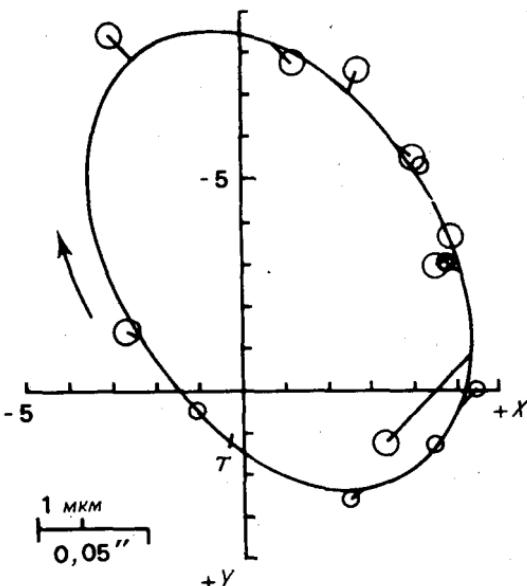


Рис. 6.13. Орбита фоточентра звезды BD + 67°552. (*Lippincott S. L. Astron. J.*, с разрешения автора и издателя.) Эта орбита построена на основе анализа траекторий, изображенных на рис. 6.12. Размер траектории не превышает 10 мкм в фокусе рефрактора обсерватории Спрул. Масса возмущающего тела равна $\frac{1}{3} M_{\odot}$. Это маленькая невидимая звезда.

Разности $(X_{ci} - X_i)$ и $(Y_{ci} - Y_i)$ должны быть пренебрежимо малыми и случайно распределенными. Если это условие не выполняется, то одна или многие опорные звезды имеют собственное движение или заметный параллакс, что искажает результаты. С другой стороны, изучаемая звезда имеет на каждой пластиинке координаты

$$X_0 = X_0 + A_1 x_0 + A_2 y_0, \quad Y_0 = B_0 + B_1 x_0 + B_2 y_0 \quad (6.51)$$

Таким образом, мы привели координаты изучаемой звезды к эталонной пластиинке. Удобно пользоваться тремя опорными звездами, при условии, что их можно считать абсолютно неподвижными.

Некоторые астрономы, например ван де Камп, используют метод редукции, называемый методом зависимостей, вводя веса в функции расстояния изучаемой звезды от звезд сравнения.

Координаты, определяемые уравнениями (6.51) для каждой эпохи наблюдений, служат для построения соотношения (6.47). Четыре неизвестные величины определяются решением этих уравнений методом наименьших квадратов. Решение дает три параметра: собственное движение, параллакс, отношение масс.

Такая работа требует весьма продолжительных наблюдений двойной звезды, порой дляящихся десятки лет. Обсерватория Спрул около Филадельфии и Флагстаффская станция Морской обсерватории США специализируются на измерениях звездных масс и параллаксов. Под руководством ван де Кампа, Липпинкотта и Странда там накоплены десятки тысяч фотографий близких звезд. Таким образом были вычислены тысячи параллаксов. Добавим, что этот метод может служить для изучения орбит двойных звезд, которые не разрешаются из-за их малого разделения или слишком слабого блеска. Эти работы увенчались также открытием первых планет за пределами Солнечной системы.

Прежде чем привести таблицу наилучшим образом известных звездных масс, для полноты изложения познакомимся со звездной классификацией.

Звезды различаются не только по размерам и массе, но и по температуре, химическому составу и физическим свойствам. Астрономы классифицируют звезды подобно тому, как ботаники растения. Классификация — это разделение звезд по каким-то признакам, которое служит для выявления законов, позволяющих лучше объяснить их природу. Классификации звезд посвящены обширные труды. Для читателя, не знакомого с ее основами, мы дадим ее краткое описание.

Звезды имеют различные цвета, в зависимости от температуры их поверхности. Это легко заметить с простым биноклем. Например, Вега и Сириус белые, Капелла желтая, как Солнце, Антарес и Бетельгейзе красные. Эти разные цвета подсказывают нам способ классификации, подобный тому, который Секки применил в 1868 г., распределив звезды по четырем классам — от более горячих до более холодных. Позднее, в 1890 г., Пиккеринг и Флемминг, используя точные спектральные наблюдения, классифицировали звезды по температурному признаку, обозначив классы прописными латинскими буквами. В начале века Кэннон на Гарвардской обсерватории установила основные принципы спектральной классификации, используемые и по сей день.

Спектральные классы звезд от более горячих к более холодным таковы: O, B, A, F, G, K, M. Каждый класс разделен на 10 подклассов. Согласно этой классификации, Солнце есть звезда класса G2, Сириус — класса A1. Оказалось возможным

связать точные измерения температуры поверхности звезд с этими спектральными классами. Эти температуры меняются от 20 000 К для звезд класса В0 до 3000 К для звезд класса М4.

Одну и ту же температуру или спектральный класс могут иметь объекты разных размеров. Например, Солнце и Капелла имеют одинаковый спектральный класс, но Капелла есть система из двух приблизительно одинаковых звезд, каждая из которых в тысячу раз больше Солнца, хотя общая масса при этом едва ли превышает в пять раз массу нашего светила. Это звезды-гиганты, для которых характерны слабое ускорение силы тяжести на поверхности и низкое давление. Таким образом вводится новый параметр — давление, — который характеризует размеры звезды. Этот новый параметр определяет так называемый класс светимости. Он обозначается римской цифрой, I соответствует звездам-сверхгигантам очень высокой светимости, VI — звездам-субкарликам. Солнце принадлежит к классу светимости V. Этот класс наиболее многочисленный и образует главную последовательность. Следовательно, полная классификация Солнца есть G2 V. Капелла состоит из двух звезд-гигантов классов G5 III и G0 III.

Все звезды укладываются в рамки этой классификации, за исключением звезд очень высокой плотности, достигаемой на конечной стадии эволюции, таких, как белые карлики и нейтронные звезды или пульсары. Эти объекты, впрочем, трудно наблюдать, и о них известно весьма мало.

Следующая таблица дает список, включающий 48 пар, общие массы которых надежно измерены. В ней приведены:

номер по каталогу Эйткена ADS или же ссылка на другой каталог,

обозначение или название,

прямое восхождение и склонение для эпохи 1950,0,

автор вычисленной орбиты и год вычисления; данные взяты из картотеки обсерватории в Ницце,

звездные величины компонентов по каталогу Финсена и Уорли (1970),

спектральный класс и класс светимости по каталогу Глизе (1969),

период в годах,

тригонометрический параллакс, взятый из того же каталога, большая полуось видимой орбиты в секундах дуги,

масса системы в солнечных массах, вычисленная с помощью третьего закона Кеплера,

отношение масс $R = M_B / (M_A + M_B)$, взятое из *Empirical data on stellar masses, luminosities and radii* Харриса III, Странда и Уорли (*Basic Astronomical Data* 1963), но с другими обозначениями.

Таблица звезд

№ по каталогу ADS	Обозначение или название	Координаты (1950)		Автор элементов орбиты
		α	δ	
48 AB *	О Σ 547	00 ^h 02,8 ^m	+45°32'	Гюнцель-Лингнер (1954)
61*	Σ 3062	00 03,5	+58 09	Бэз (1957)
520	β 395	00 34,7	-25 02	ван ден Бос (1936)
671*	Σ 60 (η Cas)	00 46,1	+57 33	Странд (1969)
-30° 529	δ 31 AB	01 32,7	-30 10	Виес-Кнудсен (1954)
	L 726-8 *	01 36,4	-18 13	Уорли и Бихолл (1973)
1865*	A 2329	02 25,1	+04 12	ван ден Бос (1962)
-12° 501	312 (ε Cet)	02 37,1	-12 05	Финзен (1970)
2402	h 3555 (α For)	03 09,9	-29 11	ван ден Бос (1956)
3841	Капелла	05 13,0	+45 57	Меррилл (1921)
31° 2902	Hu 1399 AB	05 58,5	-31 02	Бэз (1951)
	Ross 614*	06 28,3	-02 46	Липпинкотт (1955)
5423	AGC 1 (Сириус)	06 42,9	-16 39	ван ден Бос (1960)
6251	Shaeb. (Процион)	07 36,8	+05 22	Странд (1949)
6420*	β 101 (9 Pup)	07 49,5	-13 46	Дуглас (не опублико- вано)
7114	Hu 628 BC	08 55,8	+48 14	Эгген (1962)
+42° 1956*	Kui 37 (10 UMa)	08 57,6	+42 00	Бэз (1967)
+15° 2003	347 (81 Cnc)	09 09,6	+15 12	Финзен (1966)
7284	Σ 3121	09 14,9	+28 47	ван ден Бос (1937)
-39° 3651	ψ Vel	09 28,7	-40 15	ван ден Бос (1945)
8630	Σ 1670 (γ Vir)	12 39,1	-01 11	Странд (1935)
8804	Σ 1728 (α Com)	13 07,6	+17 47	Хаффнер (1938)
8862*	Hu 644	13 17,6	+48 02	Бэз (1969)
9031	Σ 1785	13 46,8	+27 14	Странд (1953)
-60° 5483	α Cen	14 36,2	-60 38	Хейнц (1959)
9413*	Σ 1888 (ξ Boo)	14 49,1	+19 19	Вилен (1962)
9617*	Σ 1937	15 21,1	+30 28	Данжон (1938)
9716	О Σ 298	15 34,3	+39 58	Куто (1965)
10075	Σ 2052	16 26,7	+18 31	Сигрист (1950)
10157*	Σ 2084 (ζ Her)	16 39,4	+31 42	Бэз (1975)
-8° 4352	Kui 75	16 52,8	-08 14	Ваут (1945)
10374	β 1118 (η Oph)	17 07,5	-15 40	Найп (1959)
+45° 2505	Kui 79	17 10,6	+45 47	Бэз (1952)
-34° 11626	Mlb 0	17 15,6	-34 56	Вилен (1962)
10585	A 351	17 27,4	+29 26	Бэз (1954)
10598*	Σ 2173	17 27,8	-01 01	Данкомб и Ашброк (1951)
10660*	β 962 (26 Dra)	17 34,5	+61 55	Бэз (1955)

Звездные величины	Спектральный класс	P, годы	Параллакс	a	Σ, M_{\odot}	R
8,9 ^m 9,0 ^m	dK6, dM0	362,3	0,094"	6,179"	2,16	0,5
,4 7,2	dG4, dG8	106,83	0,045	1,432	2,82	0,59
6,3 6,4	G5 V	25,00	0,70	0,670	1,40	0,5
3,5 7,5	G0 IV, M0 V	480	0,174	11,9939	1,42	0,39
7,8 7,9	K3 V	4,5587	0,057	0,1708	1,29	0,5
12,5 12,9	M5,5, M5,5	26,52	0,384	2,06	0,22	0,45
9,3 9,5	M1,5	25,25	0,066	0,5405	0,86	0,54
5,6 5,6	F8 V	2,667	0,069	0,108	0,54	0,5
3,9 6,5	F8 IV	154,5	0,74	2,700	2,03	
0,6 1,1	G5 III, G0 III	0,2848	0,075	0,05360	4,50	
8,4 8,9	K5 V	72,0	0,49	0,94		1,36
10,9 14,4	M7 V	16,6	14,248	0,904	0,18	0,351
1,5 8,5	A1 V,	50,09	0,377	7,500	3,14	0,33
0,4 10,3	белый карлик					
	F5 IV	40,65	0,285	4,548	2,46	0,27
5,6 6,2	белый карлик					
	G IV	23,26	0,062	0,616	1,81	0,53
10,8 11,0	M1 V	39,69	0,066	0,68	0,69	0,5
4,1 6,2	F5 V	21,81	0,64	0,640	2,10	0,427
7,2 7,2	K0 V	2,65	0,064	0,1258	1,08	0,5
7,9 8,0	K3 V	34,20		0,660	1,26	0,51
4,1 4,6	F2 IV	34,11	0,065	0,920	2,44	0,49
3,5 3,5	F0 V, F0 V	171,37	0,099	3,746	1,84	0,49
5,1 5,1	F5 V	25,87	0,053	0,662	2,91	0,51
9,2 10,0	dM2	49,18	0,119	1,44	0,73	0,412
7,6 8,0	K6 V, K6 V	155,0	0,086	2,423	0,93	0,49
0 1,2	G2 V, K0 V	79,92	0,743	17,583	2,07	0,46
4,7 6,9	G8 V, K4 V	151,505	0,148	4,9044	1,59	0,46
5,6 5,9	G2 V, G2 V	41,56	0,060	0,839	1,58	0,497
7,5 7,6	K4 V	55,88	0,041	0,785	2,25	0,478
7,7 7,8	K2 V	236,07	0,058	2,2337	1,02	0,5
2,9 5,5	G0 IV, K0 V	34,49	0,104	1,355	1,86	0,41
9,8 9,8	M4 V, M4 V	1,71504	0,161	0,218	0,84	0,5
3,0 3,5	A2,5 V	84,31	0,051	1,057	1,25	—
10,0 10,4	M3 V, M3 V	12,98	0,155	0,71	0,57	0,50
6,1 7,6	K3 V, K5 V	42,177	0,140	1,7338	1,07	0,41
9,6 10,0	dM0	60,0	0,055	0,60	0,36	—
6,0 6,1	G8 IV	46,08	0,060	1,02	2,31	0,486
5,3 7,9	G0 V	76,00	0,073	1,52	1,60	0,37

№ по каталогу ADS	Обозначение или название	Координаты (1950)		Автор элементов орбиты	
		α	δ		
10786	AC 7	17 44,5	+25 45	Куто (1958)	
11046*	Σ 2272	18 02,9	+02 32	Вилен (1962)	
11077	AC 15 (99 Her)	18 05,1	+30 33	Хайнц (1970)	
11871	β 648	18 55,2	+32 50	Шрутка-Рехтенстамм (1934)	
12889	Σ 2576	19 43,6	+33 30	Бэз (1954)	
+4° 4510*	Kui 99	20 37,0	+04 47	Бэз (1969)	
14773	O Σ 535 (δ Equ)	21 12,0	+09 48	Лейтен и Эбигасен (1934)	
14787 *	AGC 13 (t Cyg)	21 12,8	+37 49	Хайнц (1970)	
-58° 7893	φ 283	21 43,0	-57 55	Ван ден Бос (1949)	
15972	Kгю 60	22 26,3	+57 27	Липпинкотт (1952)	
17175	β 733 (88 Peg)	23 59,5	+26 49	Вилен (1962)	

Примечания

ADS 48	Согласно Бэзу, возможно присутствие третьего тела с периодом обращения 6,9 года.
ADS 61	Отношение масс указывает на наличие третьего тела B' . $m_B = 0,7$. Пара BB' должна иметь период обращения 6,9 года.
ADS 671	Параллакс и отношение масс по Странду (<i>Astron. J.</i> , 74, с периодами обращения 40 и 8,7 года (<i>Comm. Colloque de Coimbre</i> , 1974). Данные Уорли и Бехолла (<i>Astron. J.</i> , 78, № 7, 650, 1973).
L 726-8	Параллакс и отношение масс Уоннера (<i>Astron. J.</i> , 74, № 2, 1974). Новое исследование выполнено Липпинкоттом и Гершем.
ADS 1865	Параллакс и отношение масс определены Брейкайроном и Гейтвудом.
Ross 614	Новое исследование выполнено Брейкайроном и Гейтвудом.
ADS 6420	Параллакс и отношение масс определены Брейкайроном и Гейтвудом.
+42° 1956	Новое исследование выполнено Брейкайроном и Гейтвудом.
ADS 8862	Параллакс и отношение масс определены Хайнцем (<i>Astron. J.</i> , 74, № 2, 1974).
ADS 9413	Странд отмечает наличие возмущения с периодом 2,2 года, что означает, что, вероятно, имеется третье тело, малой массой.
ADS 9617	Новое исследование выполнено Брейкайроном и Дабровским.
	Данжона, хорошо описывающую наблюдения. Бэз подозревал, что имеется третий тел.
ADS 10157	Главная звезда является астрометрической двойной, согласно компонента равна $0,2 M_{\odot}$ (<i>Comm. Colloque de Coimbre</i> , 1974).
ADS 10598	Бэттен, Флетчер и Уэст находят из наблюдений лучевых параллакс и отношение масс ван де Кампа и Липпинкотта.
ADS 10660	Имеются подозрения, что существует третье тело.
ADS 11046	Отношение масс определено Морелем (<i>Astron. J.</i> , 74, № 2, 1974).
+4° 4510	Параллакс и отношение масс определены Хайнцем (<i>Astron. J.</i> , 74, № 2, 1974).
ADS 14787	

Если нанести эти результаты на график, отложив по оси абсцисс массу, а по оси ординат светимость (рис. 6.14), то видно, что наклоны отрезков, соответствующих разным системам, очень близки. Эта диаграмма указывает, что существует зависимость массы — светимость. На рис. 6.14 прямая, обозначенная пунктиром, иллюстрирует зависимость масса — светимость, найденную теоретически Эддингтоном в 1916 г.

Звездные величины	Спектральный класс	P, годы	Параллакс	a	Σ, M_{\odot}	R
10,3, 10,8 4,2 6,0 5,1 8,5	dM4, dM4 K0 V, K5 V F7 V, K5 V	43,20 87,892 55,8	0,124 0,195 0,061	1,360 4,5482 1,00	0,71 1,64 1,41	— 0,42 0,37
5,4 7,5	G0 V	61,203	0,054	1,24	3,23	0,43
8,3 8,4 8,4 9,1 5,2 5,3	dK5, dK5 K5 V F8 V, F8 V	243,55 42,35 5,70	0,047 0,062 0,055	2,15 0,84 0,26	1,61 1,39 3,25	0,5 0,489 0,49
3,8 6,4	F0 IV	49,9	0,054	0,88	1,74	0,43
9,4 9,5 9,8 11,5 5,8 8,9	K7 V dM3, dM4 G3 V	6,32 44,6 26,386	0,052 0,253 0,084	0,2335 2,412 0,8032	2,27 0,44 1,26	0,5 0,38 0,48

дом обращения 7,3 года (*Comm. Colloque de Coimbre*, 1974).

Согласно Бэзу, массы компонентов следующие: $m_A = 0,9$, $m_B = 0,7$, года (*Comm. Colloque de Coimbre*, 1974).

№ 6, 760, 1969). Бэз подозревает присутствие двух невидимых спутников (*Coimbre*, 1974).

229, 1969).

(*Astron. J.*, 77, № 8, 679, 1972).

Гейтвудом (*Astron. J.*, 80, № 4, 318, 1975).

(*Astron. J.*, 80, № 9, 714, 1975), но мы привели орбиту Бэза, хорошо опи-

J., 74, № 6, 768, 1969).

которое не подтверждено Бэзом. Бэз нашел этот период равным 10,2 массы (*Comm. Colloque de Coimbre*, 1974).

и Гейтвудом (*Astron. J.*, 80, № 9, 174, 1975). Но мы сохраняем орбиту вает наличие третьего тела с периодом, близким к 8 годам (*Comm. Colloque*

Бэзу, с периодом 10,5 года и большой полуосью 0,12". Масса невидимого 1974).

скоростей параллакс 0,060" (*Publ. Astron. Soc. Pac.*, 83, 149, 1971).

(*Astron. J.*, 81, № 9, 775, 1976).

245, 1969).

J., 75, № 7, 848, 1970).

Некоторое число звезд и пар заметно уклоняется от этого закона. Одни имеют массу, слишком большую для их блеска, как белые карлики, другие, напротив, имеют массы слишком малые, например в Кита. Наконец, обращает на себя внимание любопытный факт — несколько спутников массивнее, чем главные звезды, как, например, в системе 9 Кормы и ADS 61.

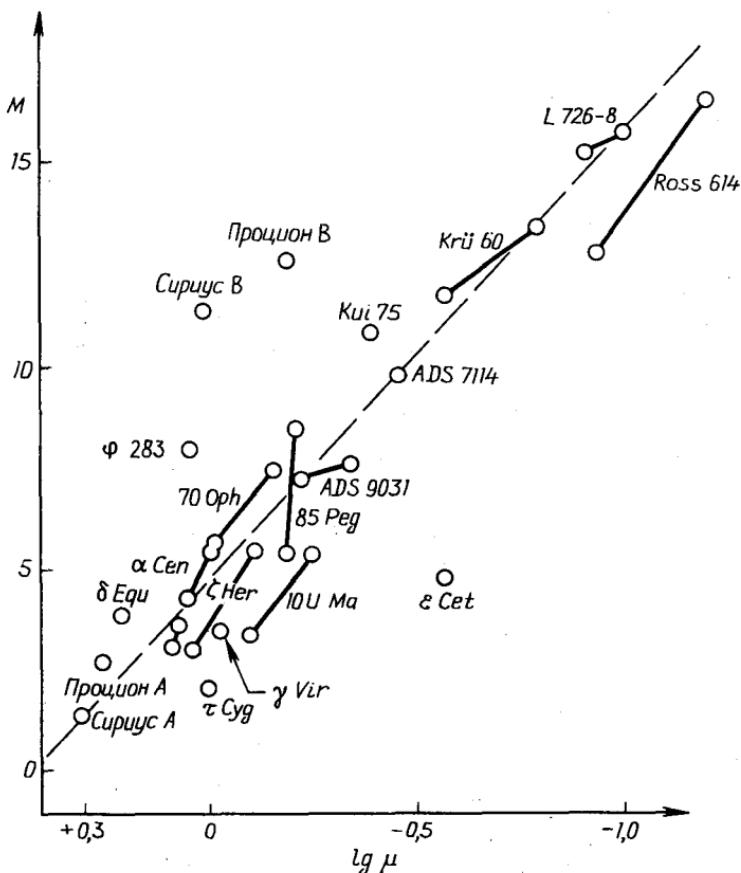


Рис. 6.14. Число используемых звезд ограничено, чтобы не загружать рисунок. Компоненты пары соединены отрезками прямых. Пунктирная линия приведена в соответствии с соотношением Бэза — Романи. По оси абсцисс отложен логарифм массы волях M_{\odot} .

Динамические параллаксы

Зависимость масса — светимость была открыта Эддингтоном при изучении внутреннего строения звезд. Многие ученые установили эту зависимость эмпирически и применяли ее для вычисления параллаксов двойных звезд с известными орбитами. Параллаксы, определенные этим способом, называются динамическими; их точность определяется тем, в какой мере справедлива зависимость масса — светимость, которой звезды подчиняются более или менее строго. Преимущество такого метода определения параллаксов состоит в том, что он позволяет определять малые параллаксы.

Существуют два основных метода вычисления динамических параллаксов: метод Рессела — Мура (1940) и метод Бэза—Романи (1946). Мы опишем второй метод, более поздний и более удобный для использования, чем первый. Впрочем, оба метода дают близкие результаты.

Бэз (1943) записывает соотношение в виде

$$\lg \mu = -k(M - M_{\odot}), \quad (6.52)$$

где μ — масса в солнечных единицах, k — постоянная, равная 0,1117, M — абсолютная болометрическая звездная величина звезды, M_{\odot} — абсолютная болометрическая звездная величина Солнца, равная 4,77^m.

Напомним, что абсолютная величина — это звездная величина, которую имела бы звезда, если бы она наблюдалась с расстояния 10 пс. Отсюда следует, что абсолютная величина M , видимая величина m и параллакс p связаны соотношением

$$M = m + 5 + 5 \lg p. \quad (6.53)$$

Это известная формула Погсона.

Звездная величина звезды, определяемая фотометрически, зависит от длины волны, к которой чувствителен приемник. Если $e(\lambda)$ есть энергия, рассчитанная на единицу длины волны, то приемник измеряет следующую величину:

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C(\lambda) e(\lambda) d\lambda,$$

где $C(\lambda)$ — коэффициент, характеризующий пропускание приемника. Если приемником является глаз, то звездная величина называется визуальной. Она называется фотографической, фотовизуальной, инфракрасной, если для ее определения применяются фотопластинки или фотоумножитель, соответственно. Болометрической звездной величиной называется величина, соответствующая полному излучению:

$$E_T = \int_0^{\infty} e(\lambda) d\lambda.$$

Разность между визуальной и болометрической звездными величинами называется болометрической поправкой и может быть записана в виде

$$\Delta m = 2,5 \lg (E/E_T) = C.$$

Между визуальной и болометрической звездными величинами существует соотношение

$$m_b = m_v + C_v, \quad (6.54)$$

где C_v — функция спектрального класса или температуры звезд.

Ниже приводится таблица болометрических поправок для звезд главной последовательности, составленная Харрисом III (1963); поправки для звезд класса M взяты по Бэзу (1943). Но для звезд класса M болометрические поправки неточны из-за селективности приемников.

Спектральный класс	C_v						
B5	-1,39	A1	-0,32	F5	-0,04	K3	-0,35
B6	-1,21	A2	-0,25	G0	-0,06	K5	-0,71
B7	-1,04	A3	-0,20	G5	-0,10	K7	-1,02
B8	-0,85	A5	-0,15	G8	-0,15	M0	(-1,22)
B9	-0,66	A7	-0,12	K0	-0,19	M2	(-1,43)
A0	-0,40	F0	-0,08	K2	-0,25	M4	(-1,67)

Рассмотрим систему двойной звезды с известной орбитой, но неизвестным параллаксом. Легко показать, что использование уравнений (6.40), (6.52) и (6.53) позволяет вычислить параллакс и массы, называемые динамическими. Запишем сначала

$$\mu_A = \mu_B = \mu_A (1 + \mu_B / \mu_A).$$

В силу (6.52) имеем

$$\mu_B / \mu_A = 10^{-k\Delta m}, \quad (6.55)$$

где Δm — разность болометрических величин компонентов, которая всегда положительна. Согласно (6.54), имеем

$$\Delta m_b = m_{vB} - m_{vA} + C_{vB} - C_{vA}.$$

Если спектральные классы одинаковы, то болометрическая поправка несущественна. Из (6.55) следует

$$\mu_A + \mu_B = \mu_A (1 + 10^{-k\Delta m}) = a''^3 / (P^3 P^2), \quad (6.56)$$

или

$$\mu_A + \mu_B = \mu_A D = \alpha^3 / p^3.$$

Здесь для простоты мы обозначили

$$D = 1 + 10^{-k\Delta m}, \quad a''^3 / P^2 = \alpha^3.$$

Подставляя формулу Погсона в соотношение масса — светимость и объединяя члены, содержащие параллакс, легко получить

$$(1 - \frac{5}{3}k) \lg p = \lg \alpha + k (m_{vA} + C_{vA} + 5 - M_\odot) / 3 - (\lg D) / 3. \quad (6.57)$$

Эта формула была получена Бэзом и Романи, но здесь она вы-

ведена более прямым путем. Используя численные значения, применявшиеся этими авторами, имеем

$$\lg p = 0,010 + 1,229 \lg \alpha + 0,046 (m_{vA} + C_{vA}) - 0,410 \lg D. \quad (6.58)$$

Таким образом находим параллакс, который называется динамическим и зависит от большой полуоси, периода, видимой визуальной величины компонента A и разности звездных величин между компонентами.

Влияние этих параметров на значение параллакса не одинаково. Так, последний член меняется от $-0,12$ для $\Delta m = 0$ до $-0,07$ для $\Delta m = 3$. Спектральный класс учитывается посредством болометрической поправки C_v . Но эта поправка входит в уравнение с малым коэффициентом, что несколько меняет результат; влияние различия спектральных классов компонентов на функцию D также невелико. Главную роль при этом играют именно параметры орбиты системы.

Тем, кто не располагает микрокалькулятором, мы рекомендуем применять уравнение (6.58), более удобное для расчетов, заменив функцию $\lg D$ двумя первыми членами разложения в ряд в окрестности начала:

$$\lg D = \lg 2 - k\Delta m/2. \quad (6.59)$$

Вплоть до значения $\Delta m = 2$ ошибка в значении параллакса составляет меньше 1 %.

Можно прямо получить массы, используя уравнения, дающие параллакс в явном виде; при этом легко находим

$$(1/k) (3 - 5k) \lg \mu A = 5 \lg D - 3 \lg \beta - 15 \lg a, \quad (6.60)$$

где $\beta = m_{vA} + C_{vA} - M_\odot + 5$, что дает с численными значениями, принятыми Бэзом — Романи,

$$\lg \mu A = -0,0315 - 0,137 (m_{vA} + C_{vA}) + 0,229 \lg D - 0,686 \lg \alpha. \quad (6.61)$$

Для компонента B имеем идентичную формулу, но вместо D надо подставить функцию D' :

$$\lg D' = \lg (1 + 10^{+k\Delta m}) = \lg 2 + k\Delta m/2 + \dots$$

Таким образом получаем массу звезды без помощи динамического параллакса. Вычислители предпочитают определять сначала динамический параллакс, который доступен прямому измерению, а не массу, так как в этом случае возможен контроль результатов путем сравнения их с окончательными тригонометрическими параллаксами. Но метод, описанный выше, дает массы компонентов, тогда как динамический параллакс дает только их сумму.

Если ограничиться двумя членами в разложении функции $\lg D$, то мы имеем согласие лучше 1 % вплоть до $\Delta m = 2$.

Уравнения (6.58) и (6.61) предполагают, что известны спектры обоих компонентов. Чаще бывает известен только общий спектр. Тогда предполагают, что оба спектра одинаковы. Вводимая таким образом ошибка пренебрежимо мала, так как два очень различных спектра соответствуют большому значению Δm , и в этом случае $\lg D$ стремится к нулю.

Если спектральный класс абсолютно не известен, то следуя Бэзу, определяют предварительную массу, величина которой дает представление о вероятном спектре, который и используется во втором приближении.

Кроме параметров орбит для вычисления масс и динамических параллаксов нужно знать визуальную звездную величину. Хорошие значения параллаксов и динамических масс обязательно связаны с надежными фотометрическими измерениями.

Рассмотрим, наконец, как влияют небольшие изменения коэффициента k на значения масс. Продифференцируем формулу (6.60) по k :

$$\frac{\partial}{\partial k} \lg \mu A = \frac{5}{(3 - 5k)^2} 3 \lg 2 - \frac{k(6 - 5k) \Delta m}{2} - \frac{9}{5} \beta - 9 \lg \alpha. \quad (6.62)$$

Масса не зависит от k , если правая часть равна нулю. Численные расчеты показывают, что это условие практически выполняется для двойных звезд спектрального класса G. Для звезд других спектральных классов этот остаток всегда мал. Этим и объясняется успех метода динамических параллаксов. Он слабо чувствителен к малым уклонениям зависимости масса— светимость.

Примеры

1. Выберем α Центавра, тригонометрический параллакс которой известен. Орбита Хейнца (1968) дает $a'' = 17,583''$, $P = 79,920$ года.

Имеем также:

	Компонент A	Компонент B
Спектральный класс	G2 V	K0 V
m_v	-0,04	1,17
C_v	-0,08	-0,19

откуда $\Delta m = 1,10$, $\lg \alpha = -0,02334$, $\lg D = 0,2439$, и мы получаем следующие значения

	Динамический	Тригонометрический
Параллакс	0,751"	0,743"
μ_A	1,14	1,12
μ_B	0,86	0,95

Динамическая масса спутника получается меньше, так как он уже подчиняется зависимости масса — светимость (рис. 6.14):

2. Выберем теперь звезду ADS 8987 = β 612 с неизвестным параллаксом. Орбита Данжона (1956) дает $a'' = 0,208''$, $P = 22,35$ года. С другой стороны, $m_{vA} = m_{vB} = 6,3$, общий спектральный класс Аб, откуда $C_v = -0,13$. Находим: динамический параллакс $0,01686''$, $\mu_A = \mu_B = 1,89''$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Помимо работ, указанных в тексте, мы приводим некоторые ссылки в соответствии с порядком расположения разделов.

Орбиты. Общие вопросы

Есть много таблиц для перехода от средних аномалий к истинным: Schlesinger F., Udick S. Tables for the true anomaly in elliptic orbits. Publ. Allegheny Obs., vol. II, 1912.

Эта таблица оканчивается на значения $e = 0,77$. Дополнительные таблицы, рассчитанные по нашей просьбе к конференции Международного астрономического союза в Беркли, можно найти:

Muller P. Tables des anomalies vraies jusqu'à l'anomalie moyenne de 20 degrés pour les excentricités égales ou supérieures à 0,75, Notes et Information, Fasc. IV, Astrométrie, No. 5. Obs. Paris, 1961.

Замечательные таблицы опубликованы в СССР в 1960 г.:

Жонголевич И. Д., Амелин В. М. Сборник таблиц и монограмм для вычисления траекторий искусственных спутников Земли. Труды Института теоретической астрономии АН СССР.

Таблицу кеплеровского движения можно найти:

Danjon A. L'Astronomie générale.

Приведенные координаты X и Y в функции эксцентриситета и средней аномалии были опубликованы в Претории в 1927 г.:

Appendix to Union Obs., Circular No. 71.

Карманные электронные калькуляторы мало-помалу делают ненужными таблицы тригонометрических функций. Однако укажем очень удобное издание:

Danjon A. Fonctions trigonométriques. Valeurs naturelles à six décimales. Hachette, 1948.

Вычисление орбит. Геометрические методы

Baize P. Comment calculer une orbite d'étoile double, L'Astronomie, janvier 1954, p. 22.

Van de Kamp P. Two Graphical Procedures for evaluating the excentricity of an astrometric double star orbit, Astron. J., 52, No. 7, 185, 1947.

Вычисление орбит. Метод Тиля—Иннеса—ван ден Боса

Van den Bos W. H. Orbit Determinations of Visual Binaries, Astronomical Techniques, Univ. of Chicago Press, 1962, p. 537. (Имеется перевод: Методы астрономии, ред. В. Хилтнер.—М.: Мир, 1967.)

Arend S. Etablissement par voie raccourcie des formules de Thiele—Innes relatives aux orbites d'étoiles doubles visuelles, en recourant aux principes de l'affinité, Ann. Obs. Toulouse, XVI, 109, 1941.

Dommanget J. Propriété du système des équations fondamentales de la méthode de Thiele—Innes pour le calcul d'orbites d'étoile doubles visuelles, J. Obs., 42, 129, 1959.

Arend S. Le rôle joué par les constantes de Thiele—Innes dans le calcul des orbites des étoiles doubles visuelles, Commun. Obs. Roy. de Belgique, No. 195, 1961.

Arénd S. Détermination du moyen mouvement annuel du compagnon d'une étoile double visuelle dont l'orbite est calculée par la méthode de Tiele—Innes, Commun. Obs. Roy. de Belgique, No. 243, 1970.

Binnendijke L. Properties of Double Stars. A survey of parallaxes and orbits. Univ. of Pennsylvania Press, 1960.

Вычисление орбит. Метод противоположных точек

Работы Данжона цитировались в тексте.

Muller P. Table pour le calcul des éléments des orbites des étoiles doubles visuelles. Ann. Obs. Strasbourg, V, 1956.

Morel P. J. Remarques sur l'utilisation de la méthode des moindres carrés dans la méthode des points opposés de Danjon pour le calcul des orbites d'étoiles doubles visuelles, Bull. Astron. Obs. Roy. de Belgique, VII, No. 4, 191, 1971.

Каталог орбит. Эфемериды

Finsen W. S., Worley C. E. Third Catalogue of orbits of visual binary stars, Rep. Obs. Johannesburg Circ., VII, No. 129, 1970.

Dommanget J., Nys O. Catalogue d'éphémérides des vitesses radiales relatives des composantes des étoiles doubles visuelles dont l'orbite est connue, Commun. Obs. Roy. de Belgique, No. 15, 1967.

Muller P., Meyer Cl. Troisième catalogue d'éphémérides d'étoiles doubles, Publ. Obs. Paris, 1969.

Массы и отношения масс

Van de Kamp P. Long focus photographic astrometry. Popular Astronomy, No. 2—5, 1951.

Van de Kamp P. Principles of Astronomy, Freeman, 1967.

Morel P. J. Contribution à la détermination photographique du rapport de masse d'une binaire visuelle, Thèse de Spécialité, Obs. Nice, 1969.

Muller P. Étoiles doubles visuelles. Masses des étoiles, Annuaire du Bureau des Longitudes, 1970.

Динамические параллаксы

Barbier D. Les Parallaxes dynamiques des étoiles doubles. Actualités Scientifiques et Industrielles, 348, 1936.

Russel H. N., Moore C. E. The masses of the stars. Univ. of Chicago Press, 1940.

- Baize P.* La Masse des étoiles et la relation empirique masse — luminosité, L'Astromonie, juillet, 1943, p. 101.
- Baize P.* Les masses des étoiles doubles visuelles et la relation empirique masse—luminosité, Bull. Astron., XIII, 123, 1947.
- Baize P., Romani L.* Formules nouvelles pour le calcul des parallaxes dynamique des couples orbitaux, Ann. d'Astrophys., IX, fasc. 2, 13, 1946.
- Dommanget J.* Les Parallaxes Dynamiques, Ciel et Terre, No. 2, 92, 1976.
- Couteau P.* Sur la validité de la relation masse—luminosité dans le calcul des masses des étoiles, Astrophys. Space Sci., 11, 55, 1971.
- Harris D. L., III, Strand K. Aa., Worley C. E.* Empirical Data on stellar masses, luminosities and radii, Basic Astron. Data, Univ. of Chicago Press, 1963, p. 273.
- В этой статье авторы дают две зависимости масса—светимость: $M_b = 4,6 - 10,0 \lg \mu$ для звезд ярче, чем $M_b = 7,5$ и $M_b = 5,2 - 6,9 \lg \mu$ для других звезд. Промежуточная зависимость Бэза имеет то преимущество, что она единственна и применима для всех значений масс.
- Baize P.* Les étoiles doubles et la relation masse—luminosité L'Astronomie, juillet, 1975, p. 306.

Глава 7

ПУТЕШЕСТВИЕ В СТРАНУ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Несколько типичных систем

Наблюдение двойной системы в телескоп подобно далекому путешествию. Если система находится на известном расстоянии и состоит из объектов, которые астроном может сравнить с нашим Солнцем, то легко мысленно перенестись туда и вообразить себе спектакль, который разыгрывается перед обитателями этой системы.

Как правило, система не выдает своих секретов — ни орбита, ни расстояние до нее не известны. Это наиболее часто встречающийся случай, с которым приходится сталкиваться при изучении почти всех классических двойных звезд, поскольку они состоят из объектов высокой светимости, медленно обращающихся по гигантским орбитам. Многие из них кажутся неподвижными по прошествии почти двух веков наблюдений, например такие, как спутник Антареса или спутник Ригеля.

Напротив, несколько известных систем образуют группу, о которой мы много знаем, что позволяет нам составить представление о населении звезд в окрестности Солнца благодаря знанию динамических параллаксов и масс.

Заметим, что периоды двойных звезд лежат в очень широких пределах — от нескольких часов для контактных систем, не наблюдаемых раздельно, двойственность которых выявляется только с помощью спектрографа, до тысячелетий. При очень больших разделениях возмущения соседних звезд разрушают систему, и каждый компонент становится одиночной звездой.

700 двойных звезд с известными орбитами являются системами со всевозможными эксцентриситетами и наклонениями орбит. Среди них имеются звезды всех спектральных классов. Двойные звезды, по-видимому, не составляют выделенного класса, внутреннее строение звезды в двойной системе не отличается от строения одиночной звезды. Число двойных очень велико. Большинство звезд входят в двойные или кратные системы, а одиночные звезды, такие, как наше Солнце, составляют меньшинство.

Распределение на небе двойных звезд такое же, как и одиночных. Их орбиты не образуют однородного класса, а это означает, что пары с известными орбитами занимают объем, малый по отношению к полному объему Галактики. Как показывают динамические параллаксы, пары с известными орбитами находятся в сфере радиусом в сотню парсек с центром в Солнце.

Изучение двойных звезд позволило сравнить звезды с Солнцем по массам, светимостям и размерам. Размеры известных двойных систем сравнимы с размерами орбиты Плутона. Напомним, что наше светило занимает среднее положение на шкале масс и светимостей. Размеры звезд так различны, что трудно указать крайние значения. Известны звезды с массой, равной массе Солнца, но по размерам не превосходящие французский департамент. Некоторые же звезды так велики, что не уместились бы в Солнечной системе. Красные карлики весьма распространены, это наиболее обильное звездное население. Среди сотни ближайших звезд Солнце занимает четвертое место по светимости. Температуры поверхностей звезд меняются от 2500 К для звезд класса M до десятков тысяч для звезд классов O и B.

Нетрудно представить себе зрелище, которое мы увидели бы с Земли, если бы она была планетой двойной системы. Вообразим себе такого Микромегаса, обитателя системы Сириуса, расположенной на расстоянии от нас 2,5 пс, или 8 световых лет. Пусть планета обращается вокруг этой звезды на таком же расстоянии, как Земля от Солнца. С этой планеты Сириус выглядел бы как огненный шар более 1° в диаметре, испускающий ослепительный белый свет. Он сиял бы ярче ста Солнц. Спутник Сириуса выглядел бы ночью как обычная звезда диаметром в 1'', испускающая тусклый свет, который освещал бы планету как полная Луна. Диаметр Сириуса В всего 15 000 км, хотя его масса сравнима с массой Солнца. При наблюдении с планеты эту маленькую звездочку заслонил бы волос, находящийся на расстоянии два метра. Поверхность этого светила была бы неразличимой, она, вероятно, ровная как пляж, поскольку сила тяжести превышает земную в 10 000 раз, так что существование какого-либо рельефа там невозможно.

Наша ближайшая соседка α Центавра, расположенная на расстоянии от нас четыре световых года, очень похожа на наше Солнце. Для обитателей этой системы день как две капли воды был бы похож на земной, но ночи были бы освещены компонентом прекрасного медного цвета, обращающимся по орбите радиусом, равным радиусу орбиты Нептуна. Диск спутника был бы неразличим невооруженным глазом, но он бы светил в тысячу раз ярче Луны. В некоторые эпохи, близкие к оппозиции, ночи бы вообще не было — оба солнца сменяли бы друг друга над горизонтом (рис. 7.1).

Многие системы состоят более чем из двух звезд, и для них характерна динамическая иерархия типа Солнце—Земля—Луна. Так, обитатели системы Kui 23, расположенной на расстоянии 71 световой год от нас, имеют центральное светило, похожее на Капеллу, которая в 50 раз больше, чем наше Солнце. Ночью на их небе светит двойная звезда, обращающаяся по орбите, промежуточной между орбитами Юпитера и Сатурна. Этот двойной спутник не разрешим с Земли. Он состоит из звезд примерно солнечных размеров, обращающихся одна вокруг другой на рас-

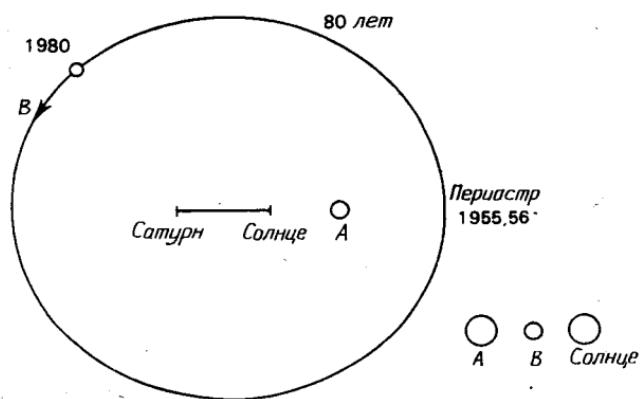


Рис. 7.1. Истинная орбита системы α Центавра. Система включает третью звезду — очень удаленный от основных компонентов красный карлик. Объект А сравним с Солнцем, объект В обращается по орбите размером с орбиту Нептуна. Кружки внизу справа представляют относительные размеры компонентов пары и Солнца.

стоянии 7 000 0 00км с периодом 9 суток. Светила-близнецы красивого красного цвета иногда взаимно затмеваются и образуют естественные часы в небесах Kui 23. Они вдохновляли бы художников и поэтов, живущих на планетах этой системы, и представляли бы астрономам неисчерпаемый выбор тем для исследований (рис. 7.2).

Жители тройной системы 13 Кита (рис. 7.3), расположенной на расстоянии 56 световых лет от Солнца, наслаждались бы видом центрального двойного светила, состоящего из двух звезд — желтой и красной,— обращающихся с периодом 3 суток на расстоянии 5 000 000 км друг от друга. Их кружение в вечном вальсе вдохновляло бы художников и астрономов. Ночью на небе светит красный карлик. Каждые 7 лет он находится в точке орбиты, в которой соперничает в блеске с главной звездой. Это целая феерия света, и в некоторые эпохи там не бывает ночей, так как

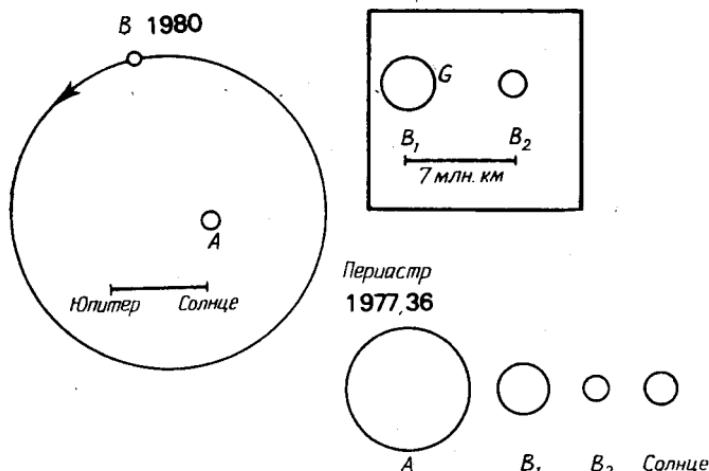


Рис. 7.2. Истинная орбита тройной системы Kui 23 = 1 Близнецов. Эта система состоит из одиночной главной звезды и двойного спутника B_1 , B_2 , обращающегося с периодом 13 лет по слегка вытянутой орбите такого же размера, как орбита Сатурна. В квадрате вверху представлена неразрешимая двойная система B в масштабе, увеличенном в 100 раз. Вращение системы B_1 , B_2 вокруг центра масс G происходит с периодом 9 суток по круговой орбите диаметром 7 000 000 км. Внизу справа дано сравнение размеров звезд с Солнцем.

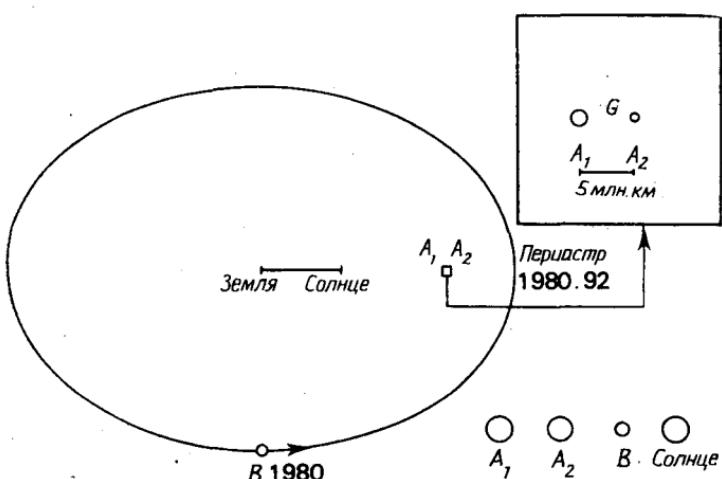


Рис. 7.3. Истинная орбита тройной системы ADS 490 = 13 Кита. Тройная система 13 Кита включает двойную главную звезду A_1 , A_2 , не разрешимую визуально, и спутник B , обращающийся с периодом 7 лет вокруг центральной системы по весьма вытянутой орбите, размерами чуть меньше орбиты Юпитера. В квадрате вверху показаны в 20 раз большем масштабе размеры A_1 и A_2 и расстояние между ними, а также положение центра масс G . Период обращения системы A составляет 2 дня. Внизу справа размеры звезд сравниваются с размерами Солнца.

красное светило восходит и начинает светить, когда центральное двухцветное светило опускается за горизонт. Иногда на небе видны сразу все три светила, освещдающие пейзаж, пересеченный тремя тенями от каждого предмета на поверхности планеты.

В других системах, типа ξ Большой Медведицы, каждый компонент двойной звезды в свою очередь является двойным. Кастор — шестикратная система, в которой видимая пара состоит из двух двойных компонентов, и вокруг системы на очень большом расстоянии обращается двойной красный карлик.

Эти несколько примеров показывают, что визуально-двойные звезды состоят из объектов, очень удаленных один от другого на расстояния, в сотни и тысячи раз большие, чем их диаметры, даже в случаях, когда для земного наблюдателя компоненты пары почти сливаются. Дифракционное изображение во много раз превышает видимые размеры звезд, видимый диаметр которых составляет по порядку величины 0,001''.

Во всех этих системах наблюдается иерархия в расположении компонентов в противоположность скоплениям звезд, где динамический центр определяется всей массой скопления. В скоплении звезды не движутся по орбитам вокруг друг друга, это системы, находящиеся на пути к разрушению, как Плеяды, или к формированию равновесной конфигурации, как шаровые скопления. Двойные звезды иллюстрируют кеплеровское движение относительно многих центров масс. Мы находим примеры кеплеровского движения среди спутников нашей Солнечной системы. Например, искусственные спутники Луны обращаются вокруг центра масс Луны, которая в свою очередь обращается вокруг барицентра системы Земля—Луна, а весь ансамбль обращается вокруг Солнца, но не вокруг центра масс Солнечной системы. Мы не касаемся здесь сложных проблем небесной механики, для которой некоторые тройные системы, находящиеся на пределе динамической устойчивости, такие, как ζ Геркулеса, представляют большой интерес.

Возможности путешествия в зависимости от инструмента

Путешествие наблюдателя в страну двойных звезд — это не игра воображения. Ведь он видит небесные тела так, как если бы приблизился к ним. Но большой инструмент предоставляет более богатый выбор «маршрутов», поскольку дает заметный выигрыш в свете и в разрешающей способности. Способность видеть движения во Вселенной, считать звезды, «прогуливаться» по Млечному Пути, открывать объекты, которые еще никто не видел, зависит от размера инструмента. Уточним возможности такого путешествия, остановившись на некоторых его аспектах.

Как агенты бюро путешествий мы будем предлагать «маршруты», которые были бы по средствам нашим туристам.

Изучим ответ на первый вопрос: «Сколько нужно времени, чтобы узнать орбиту только что открытой, двойной звезды?» Этот вопрос определяет темпы получения информации о двойной звезде. Чтобы можно было вычислить орбиту, нужно ждать столько времени, сколько требуется для совершения половины оборота с момента открытия. Как этот интервал времени зависит от разделения компонентов и отверстия инструмента?

У вновь открытой пары измеряют разделение ρ . Можно предположить, что большая полуось орбиты статистически мало отличается от этой величины. Автор этих строк показал (1960), что в среднем справедливо соотношение $a'' \approx 1,25 \rho$. Значит, если мы хотим найти пары с наиболее быстрым орбитальным движением, то нужно искать среди тех из них, которые находятся на пределе разрешающей способности. Выразим величину ρ через разрешающую способность $12/D$, что позволяет вывести среднюю большую полуось

$$a'' \approx 15/D, \text{ или } a[\text{а. е.}] \approx 15r/D, \quad (7.1)$$

где r — расстояние в парсеках, D — диаметр объектива в сантиметрах.

С другой стороны, можно предположить, что масса системы близка к двум солнечным. Применение третьего закона Кеплера дает период по порядку величины

$$P^2 \approx 1,2 \cdot 10^3 r^3/D^3. \quad (7.2)$$

Для одного и того же параллакса самые короткие периоды P_1 и P_2 , доступные для телескопов с отверстиями D_1 и D_2 , подчиняются следующему соотношению:

$$P_1/P_2 = (D_2/D_1)^{3/2}. \quad (7.3)$$

Если отверстие вдвое больше, то при одном и том же расстоянии до системы наиболее короткий доступный период в 2,8 раза меньше. Итак, скорость получения информации возрастает как $D^{3/2}$.

Следующая таблица дает скорость получения информации для нескольких апертур при расстоянии до звезды 100 п.с.

D , см	P , годы	Время получения информации, годы
150	18	9
100	35	17
50	97	48
25	280	140
10	1100	550

Эта таблица показывает ценность больших апертур для открытия двойных звезд и возможность вычисления орбит с разумной точностью. Чтобы астроном имел шанс пронаблюдать орбиту двойной, которую он открыл, ему нужно располагать рефрактором по крайней мере диаметром 70 см. И тем не менее ему придется ждать в среднем 25 лет, чтобы вычислить орбиты объектов, расположенных на расстоянии 100 пс.

Проникновение в глубь пространства с помощью инструмента

До какой глубины в пространстве и с каким инструментом доступны пары с периодами меньше некоторого данного периода?

Ответ на этот вопрос позволит нам определить «орбитальную глубину» инструмента. Чтобы ответить на этот вопрос, наложим следующие ограничения:

1. Рассмотрим лишь периоды меньше 200 лет, соответствующие времени получения информации 100 лет — задержка, весьма долгая по сравнению с активной жизнью астронома.

2. Рассмотрим лишь пары, доступные наблюдениям при данной разрешающей способности инструмента.

3. Предположим, что массы звезд близки к массе Солнца.

4. Наконец, ограничимся лишь парами с одинаковыми компонентами, видимые величины которых ярче или равны 10^m . Как показывает опыт, для любого отверстия телескопа такая звездная величина является пределом. При наблюдении в большой инструмент изображения размываются, фрагментируются, разлагаются в кольца и глаз уже не получает выигрыша в свете.

Условия (1) и (3) показывают, что большие полуоси ограничены значением $a = 43$ а. е. Условие (2) накладывает ограничение на нижний предел разделения, ниже которого компоненты пары более не разрешаются:

$$a_r [\text{а. е.}] = 15r/D. \quad (7.4)$$

С другой стороны, из условия (4) следует соотношение

$$\lg r \approx 3 - 0,2M, \quad (7.5)$$

дающее радиус сферы с центром в Солнце, внутри которой звезды абсолютной величины M имеют видимую звездную величину по крайней мере 10^m . Подставляя в это последнее соотношение $a_1 = 43$ а. е., выводим максимальную видимую большую полуось a_1'' , больше которой период превышает 200 лет:

$$\lg a_1'' \approx 0,2M - 1,37. \quad (7.6)$$

Наконец, подставляя закон Погсона в соотношение (7.4), нахо-

дим минимальное значение полуоси a_r в астрономических единицах:

$$\lg a_r \approx 3 - 0,2M + \lg(15/D). \quad (7.7)$$

Случай $a_r = a_1 = 43$ а. е. соответствует инструментальному пределу наблюдения орбит. Он имеет место при

$$\lg r \approx \lg D + 0,45. \quad (7.8)$$

Это уравнение определяет «орбитальную глубину». С этим предельным расстоянием связана абсолютная звездная величина

$$M \approx 12,75 - 5 \lg D. \quad (7.9)$$

Эти соотношения дают лишь порядок величины. Можно было бы их уточнить, усложняя запись и вводя соотношение масса — светимость. Но от этого искомый ответ не выиграл бы в ясности.

В следующей таблице приведены лишь звезды главной последовательности. В ней для разных спектральных классов даны абсолютная звездная величина M , расстояние в парсеках r , на котором звезда имеет видимую величину 10^m , соответствующий объем; за единицу объема принят объем сферы радиусом 100 пс. Далее приводятся видимое разделение, для которого период равен 200 лет, и предельное отверстие инструмента.

	A5	F5	G0	G5	K0	K5
M	2,2	3,5	4,4	5,1	6,0	7,8
r	360	200	130	96	63	28
V	47	8	2	0,9	0,25	0,02
a_1	0,12"	0,21"	0,32"	0,45"	0,67"	1,55"
D , см	125	70	45	33		

Начиная с класса G5 не дифракционные явления, а блеск ограничивает наблюдения красных карликов. С объективом 125 см можно наблюдать пары с периодами 200 лет до расстояния 360 пс, или 1200 световых лет, состоящие из звезд класса A5 или более поздних. Исследуемый при этом объем в 24 раза превышает объем, доступный инструменту с апертурой 45 см. Последнему доступны при прочих равных условиях звезды солнечного типа до расстояния 130 пс. Иначе говоря, можно наблюдать двойные звезды, значительно более удаленные и более яркие, но их периоды превосходят 200 лет и вычисление их орбит откладывается на еще более длительный срок.

Страна двойных звезд с орбитами, доступными вычислениям при наших современных средствах, ограничена сферой радиуса

1200 световых лет. Это уже значительный объем, занимающий всю толщу галактического диска в периферической области, в которой расположено наше Солнце.

Таблица показывает, почему звезды классов F и G находятся в привилегированном положении по отношению к наблюдательной селекции: предельные пары, которые представлены в ней, соответствуют отверстиям от 90 до 40 см. Именно такие рефракторы служат для поисков двойных звезд. Эти пары находятся на расстояниях от 100 до 300 pc.

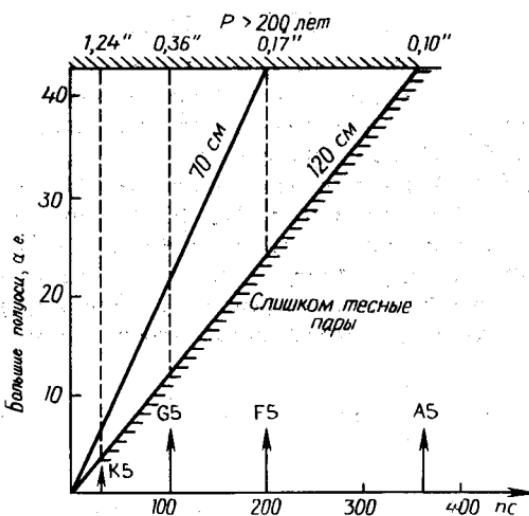


Рис. 7.4. Телескоп с отверстием 120 см позволяет наблюдать орбиты с периодом меньше 200 лет до расстояния 350 pc, или 1150 световых лет, но до такого расстояния можно наблюдать только гиганты. Звезды типа Солнца наблюдаются только до расстояния 150 pc, или 500 световых лет. С телескопом 70 см можно достичь лишь расстояния 200 pc, или 650 световых лет.

На рис. 7.4 изображена область пространства, в которой орбиты являются наблюдаемыми. По оси абсцисс отложено расстояние в парсеках, по оси ординат — большие полуоси в астрономических единицах. Горизонтальная прямая соответствует максимальному значению большой полуоси, большее которого периоды превышают 200 лет. Прямые, исходящие из начала координат, определяют минимальные большие полуоси для инструментов с отверстиями 120 и 70 см. Штриховыми линиями обозначены предельные расстояния, дальше которых звезды класса, обозначенного стрелками, имеют слишком слабый блеск.

Примеры. Орбита звезды класса F5 наблюдается с расстояния 200 пс, дальше которого она слишком слаба ($m > 10$). На предельном расстоянии 200 пс разделения компонентов заключены между 0,1 и 0,17''.

Орбита звезды класса В наблюдается до расстояния 360 пс.

Пусть пара состоит из звезд класса G5 на расстоянии 160 пс от нас. Большая полуось орбиты равна 30 а. е. Такое разделение позволяет наблюдать ее орбиту, но не величину.

Предположим теперь, что имеется пара класса A5 на расстоянии 300 пс с орбитой, большая полуось которой 20 а. е. Звездная величина такой пары позволит ее увидеть; но разделение будет слишком мало для вычисления орбиты.

Так можно объяснить преобладание красных карликов, для которых известны орбиты, по сравнению с другими типами звезд. Все известные красные карлики очень близки к нам. Одному и тому же угловому разделению в этом случае соответствует видимая большая ось орбиты, меньшая, чем для других типов, откуда и следуют короткие периоды, определяемые достаточно быстро. Поскольку горячие звезды класса В в среднем находятся на гораздо больших расстояниях, такие пары разрешимы только в том случае, если они имеют длинные периоды обращения.

Число орбит, доступных инструменту

Теперь мы можем уточнить закон распределения орбит по спектральным классам звезд. Пусть

$$dn = q(a) da \quad (7.10)$$

есть число двойных в единице объема в интервале больших полуосей da на расстоянии r от Солнца. Попытаемся найти число орбит, обнаруживаемых в телескоп диаметра объектива D , в зависимости от спектрального класса звезд.

Число доступных наблюдению двойных в единице объема на расстоянии r , следовательно, равно

$$n(r) = \int_{a_r}^{a_1} q(a) da = q(a_1 - a_r),$$

где мы предполагаем q постоянным — приближение, разумное, если принять во внимание малость интервала интегрирования. Для каждого спектрального класса константа q определяется пространственной плотностью звезд в окрестности Солнца и доля наблюдаемых двойных. Можно, таким образом, записать число N_{sp} доступных наблюдениям двойных каждого спектрального класса:

$$N_{sp} = \int_0^{r_0} 4\pi qr^2 (a_1 - a_r) dr. \quad (7.11)$$

Расстояние r_0 ограничено, с одной стороны, соотношением

$$\lg r = 0,45 + \lg D$$

для звезд высоких светимостей, предельная звездная величина которых соответствует большим расстояниям, а с другой — предельной звездной величиной 10^m для низких светимостей:

$$M = m + 5 - 5 \lg r.$$

Из этих условий находим число звезд N_{sp} для каждого спектрального класса A, F, G, K, M класса светимости V. Подставляя (7.4), получаем для первого условия

$$N_{sp} \approx \pi q a_1^4 D^3 / 3 \cdot 15^3. \quad (7.12)$$

Отсюда следует, что количество информации о двойных звездах возрастает как куб отверстия телескопа. Для звезд низкой светимости имеем

$$N_{sp} \approx 4\pi q r^3 [(a_1/3) - (15r/4D)]. \quad (7.13)$$

Численные значения даны в следующей таблице. Здесь приведено число двойных с доступными наблюдениями орбитами для различных отверстий телескопов и число двойных, известных в настоящее время.

D , см	A	F	G	K	M	Всего
100	1400	1660	700	230	9	≈ 4000
50	175	230	343	189	9	≈ 950
Известно	66	139	106	50	21	382

Заметно расхождение между числом доступных и известных орбит. Видно также, что известно большее число двойных спектрального класса M, чем предсказывается. Это объясняется тем, что эти двойные обычно широко разделены, часто на много секунд дуги, поэтому их орбиты легче доступны наблюдениям и вычислениям, что увеличивает предельную звездную величину примерно до значения 12^m .

Следовательно, имеются эффекты наблюдательной селекции, которые можно исследовать количественно, сравнивая для каждого спектрального класса отношение R числа наблюдаемых пар к числу всех пар. Обратимся снова к уравнению (7.10) и запишем число пар, орбиты которых наблюдаются; при этом интегрирование проводится от a , до a_1 , затем распространяется на сферу,

соответствующую предельной величине 10^m с параметром $a_1 D/15$ [см. уравнение (7.1)] в качестве верхнего предела:

$$\lg r = 3 - M/5 \leqslant \lg(a_1 D/15).$$

Тогда имеем

$$n(M) = \int_0^{a_1} \int_{a_r}^{a_1} 4\pi q(a) r^2 dr da = \frac{4}{3}\pi r^3 Q(a_1) - \int_0^{a_1} Q(a_r) 4\pi r^2 dr.$$

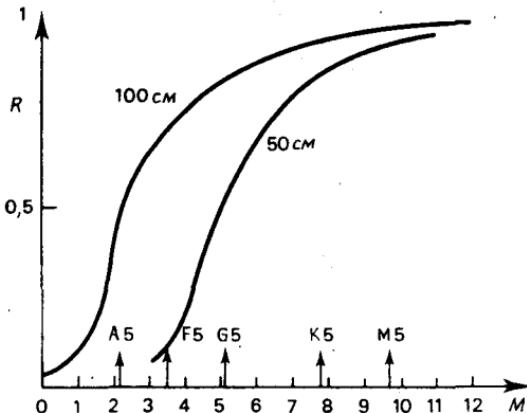


Рис. 7.5. Отношение R в зависимости от спектрального класса для двойных с периодами меньше 200 лет. Телескоп с отверстием 1 м позволяет наблюдать половину систем, состоящих из звезд спектрального класса A5, а телескоп с отверстием 50 см — едва ли $1/10$ от полного числа таких систем.

С другой стороны, если принять во внимание все пары в интервале $(0, a_1)$, имеем

$$N = \int_0^{a_1} \int_0^{a_1} 4\pi q(a) r^2 dr da = \frac{4}{3}\pi r^3 Q(a_1).$$

Искомое отношение R есть $n(M)/N$ и запишется в виде

$$R(M) = 1 - 3 [r^3 Q(a_1)]^{-1} \int_0^r Q(a_r) r^2 dr = 1 - F(r) \quad (7.14)$$

при $r \leqslant a_1 D/15$.

При $r \geqslant a_1 D/15$ отношение $R(M)$ запишется в виде

$$R(M) = [1 - F(a_1 D/15)] a_1^3 D^3 / (15r)^3. \quad (7.15)$$

Предполагая функцию q постоянной, что малооправдано, но разумно вследствие отсутствия сведений о законе распределения орбит, находим

$$\lg(1-R) = 2,05 - \lg(a_1 D) + (m-M)/5 \quad \text{при } r \leq a_1 D/15,$$

$$\lg R = -7,13 + 3 \lg(a_1 D) + 0,6(M-m) \quad \text{при } r > a_1 D/15.$$

Для пар низкой светимости, невидимых на больших расстояниях, R стремится к единице. Оно быстро убывает по мере перехода к горячим звездам. С наибольшими телескопами лишь у четверти пар спектрального класса А можно было бы наблюдать и вычислять орбиты. На рис. 7.5 показано отношение R для отверстий от 1 м до 50 см. Итак:

три четверти двойных звезд спектрального класса А с большими полуосами меньше 40 а. е. и ярче 10^m являются слишком тесными, чтобы их можно было наблюдать;

величина R достигает 0,5 для звезд класса F;

0,25 для звезд класса G7;

вероятность получить орбиту двойной звезды спектрального класса В и звездной величины 10^m практически стремится к нулю;

для двойной, состоящей из карликов класса M, с большой уверенностью орбита получится достаточно быстро.

Возможности глаза по сравнению с инструментами

Фотографическая пластина и пленка более чувствительны, чем глаз, но глаз лучше подходит для изучения дифракционного изображения. Можно сравнить возможности глаза с возможностями его конкурентов и определить его место в ряду многочисленных приемников излучения.

Чтобы провести такое сравнение, рассмотрим простой случай: пару, состоящую из одинаковых компонентов солнечного типа с периодом обращения 200 лет,— и предположим, что она находится на пределе разрешающей способности s . Видимая звездная величина компонентов равна $m = 7,9 - 5 \lg s$. Это соотношение разделяет на диаграмме (m, s) область двойных с периодами меньше 200 лет. На диаграмме (рис. 7.6) нанесены точки, представляющие возможности глаза, интерферометра, фотопластинки и электронографической пластиинки. Эти данные можно суммировать в виде таблицы.

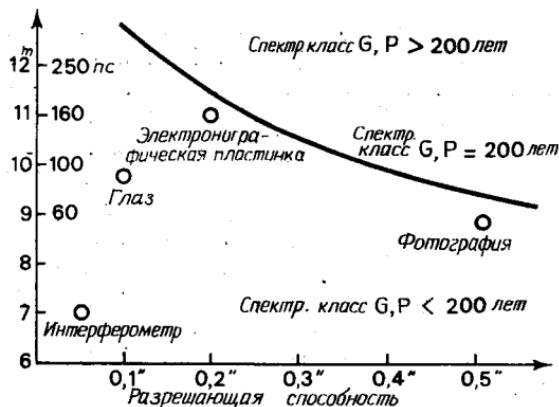


Рис. 7.6. Рисунок показывает предел разрешения и чувствительности для различных приемников. Кривая разграничивает области, соответствующие орбитам звезд солнечного типа с периодами больше или меньше 200 лет. Человеческий глаз достаточно чувствителен и обладает высоким разрешением.

	Чувствительность	Разрешающая способность	Эффективность	Регистрация информации
Глаз	Низкая	Высокая	Высокая	Невозможна
Фотография	Высокая	Низкая	»	Возможна
Электронографическая пластина	»	Высокая	Низкая	»
Интерферометр	Низкая	»	»	»

Путешествие астрономов обсерватории в Ницце на борту экономичного космического корабля

Французская обсерватория, наилучшим образом оснащенная для изучения двойных звезд, расположена на лесистом холме Монт-Грос к востоку от Ниццы. Она располагает двумя большими рефракторами с объективами 74 и 50 см, которые позволяют астрономам путешествовать от одной звезды к другой. Каждую благоприятную ночь визуальная экспедиция отправляется в путь на расстояние несколько сотен световых лет, где астроном «прогуливается» среди объектов, которые никто раньше не видел. При этом «проезд» бесплатный, несчастные случаи редки, путешественник всегда возвращается назад, даже если он «заблудился» среди звезд. Но даже управление таким чудесным космическим аппаратом, как телескоп, всегда утомляет. Чтобы стоять 8—10 часов у телескопа с поднятыми руками, изогнувшиими и согнув ноги, и проверять 600 или 700 звезд с увеличениями

от 600 до 1000 раз, требуется спортивная тренировка, очень полезная для укрепления здоровья. Как и космический полет, такое путешествие готовится весьма тщательно — ведь нельзя рассчитывать на авось. Открытие — это вознаграждение за точное исполнение скрупулезно разработанных планов.

Как уже отмечалось в первой главе, Мюллер и автор этой книги выполняют исследования северной полусфера: Мюллэр — к северу от 55° , автор — между 17° и 55° . Исследование началось десять лет назад. Мюллер практически завершил свою программу, собрав урожай в 600 двойных звезд. Автор открыл 1500 пар в области неба площадью 6500 квадратных градусов (всего программа охватывает область площадью 11 000 квадратных градусов).

Мюллер исследует звезды каталога AGK3, автор — звезды каталога Аргеландера. Звезды этого последнего каталога были записаны на магнитной ленте и были составлены удобные списки для наблюдений, охватывающие зоны 2° . Уже известные пары обозначены на магнитной ленте по *Index Catalogue*. Они служат реперами на небе; подобно дорожным знакам, они показывают, что наблюдатель находится на верном пути.

Следующая таблица иллюстрирует вклад обоих авторов в исследование наблюдаемых ими областей неба.

ρ	Область, наблюдаемая Куто		Область, наблюдаемая Мюллером	
	известные пары	новые пары	известные пары	новые пары
$\leqslant 0,2''$	100	152	35	87
$<0,5''$	450	472	200	244
$<1''$	800	854	400	350

Среди звезд с малым разделением число новых пар больше, чем число ранее известных пар. Это тесные пары, для которых можно быстро определить орбиты. Впрочем, многие двойные звезды «играют в прятки» с наблюдателями, маскируясь под одиночную звезду в момент поисков, с тем, чтобы обнаружить свою двойственность спустя некоторое время. Особенно типичны в этом отношении звезды θ Короны, τ Овна, 13 Пегаса, 39 Волос Вероники, хорошо разрешаемые в настоящее время, но не наблюдавшиеся как двойные в начале века. Любители, оснащенные инструментами средних размеров, могли бы открыть эти пары раньше профессионалов.

Путешествие в страну двойных звезд имеет смысл лишь в том случае, если оно обогащает наш опыт. Открытие двойных звезд

не является самоцелью; нужно исследовать избранные области неба, чтобы лучше узнать законы, которые управляют Вселенной.

Две тысячи новых пар — это достаточно большое число, чтобы мы могли извлечь из их анализа полезные сведения. Сначала мы делим звезды на два класса — гиганты и карлики, т. е. пытаемся определить их спектральные классы и классы светимости. Затем мы используем эти результаты, чтобы определить, начиная с момента открытия двойной звезды, приближенное значение периода. Затем мы составляем список замечательных пар, которые следует держать под постоянным контролем.

Определение классов светимости вновь открытых двойных звезд

Из 2100 пар, открытых в Ницце и частично в других местах на протяжении последних 15 лет, значительное число пар имеют длинный период, а спектральный класс их не известен. Разумно исключить из рассмотрения пары, которые не дадут нам никаких полезных сведений, т. е. пары, состоящие из звезд-гигантов, видимых издалека и остающихся практически неизменными в течение веков. В среднем чем теснее пара, тем короче ее период. С другой стороны, для любого строгого исследования очень важно знать спектральный класс и собственное движение пары. Поэтому мы оставляем лишь пары, имеющие разделение меньше 0,5'', для которых спектры и собственные движения известны.

Если построить диаграмму, показывающую распределение по собственным движениям звезд различных спектральных классов, то окажется, что оно напоминает гауссово с меньшим разбросом для звезд типа Солнца. В приводимой ниже таблице для каждого спектрального класса указаны наиболее часто встречающиеся значения собственных движений.

Спектральный класс	A	F	G	K
lg годичного собственного дви- жения	—1,90	—1,70	—1,45	—1,80

Поскольку статистически собственное движение пропорционально параллаксу, отношение этих двух величин близко к постоянному значению. Можно заключить, что среди вновь открытых двойных звезд наиболее близкие имеют спектральный класс G, затем идут звезды классов F, K и A. Если среднее расстояние для звезд класса G принять за единицу, то расстояния для звезд классов F, K и A составят 1,8; 2,2 и 2,8. Однако средняя видимая звездная величина приблизительно одинакова для всех открытых пар. Отсюда можно заключить, что абсолютные звездные

величины звезд различны, и сделать некоторые выводы. Результаты приведены в следующей таблице:

	К	G	F	A
Расстояние	2,2	1	1,8	2,8
Абсолютная звездная величина	$M + 0,50$	$M + 2,25$	$M + 1$	M
III, IV, V	2,50	2,90	2,13	1,2

Третья строка дает абсолютные звездные величины по отношению к абсолютной величине звезд класса А. Четвертая строка содержит средние абсолютные звездные величины, когда классы светимости III, IV и V встречаются одинаково часто. Заметим, что звезды спектральных классов F и A одинаково представлены, что звезды класса G принадлежат в основном к главной последовательности (класс светимости V), но среди звезд класса К больше всего гигантов, так как они имеют высокую светимость и видны с очень больших расстояний.

С помощью этих рассуждений покажем, как отделить объекты главной последовательности от других объектов.

Сформулируем рабочую гипотезу, что все вновь открытые двойные звезды принадлежат к главной последовательности, и построим диаграмму, на которой по оси абсцисс отложим логарифм собственного движения, а по оси ординат — логарифм параллакса. Звезды на этом графике не располагаются случайным образом. Прежде всего имеется разделение по параллаксам, поскольку интервал видимых звездных величин очень узкий — от 7,5 до 10^m — каждый спектральный класс занимает достаточно узкую горизонтальную полосу по оси ординат (рис. 7.7).

Видно также, что звезды класса А располагаются вверху справа, в области, соответствующей малым собственным движениям и параллаксам. Объекты классов F и G занимают обширную область вдоль оси собственных движений. Что касается звезд класса К, то они находятся в двух различных областях: одна соответствует главной последовательности, для звезд которой характерны большие собственные движения, другая, очевидно, образована гигантами.

Прямая $\lg \pi = \lg \mu - 0,7$ проходит через зоны, где должны группироваться звезды главной последовательности. С другой стороны, около прямой $\lg \mu = -1,8$ также сосредоточено много звезд, которые, если исключить очень горячие объекты, не принадлежат к главной последовательности. Конечно, малость собственных движений является лишь статистическим, но не абсолютным критерием для классификации по светимостям.

На этой диаграмме имеются объекты, располагающиеся вдоль наклонной прямой и соответствующие главной последовательности. В правой части диаграммы присутствуют звезды-гиганты с малым собственным движением, которые имеют абсолютную визуальную звездную величину от 0,5 до 3. Этот график позволяет, таким образом, отождествить звезды главной последовательности. Результаты такого отождествления 351 пары с раз-

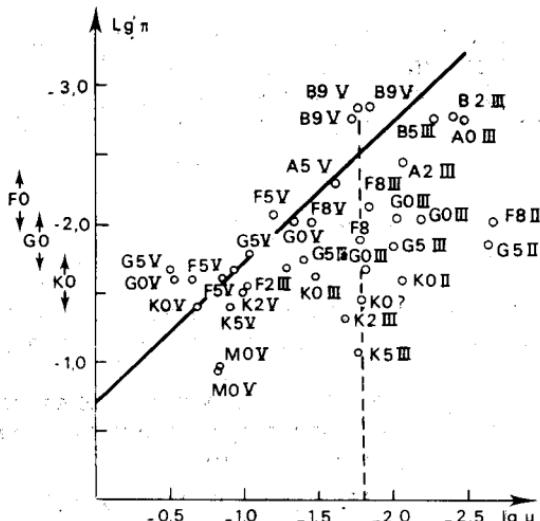


Рис. 7.7. Диаграмма собственное движение — параллакс. Нанесены данные для некоторых звезд с известными собственными движениями в предположении, что они принадлежат к главной последовательности. Истинные звезды главной последовательности лежат вдоль жирной прямой. Другие звезды расположены в достаточно широкой окрестности около пунктирной прямой. Таким образом можно подразделять звезды на гиганты (классы светимости III и IV) и карлики (класс светимости V).

делением меньше $0,5''$, для которых собственные движения и спектральные классы известны, приведены в следующей таблице.

	K	G	F	A	B	M
Годичное собственное движение	0,050"	0,025"	0,016"	0,01"	0,006"	0,12"
Число звезд главной последовательности	11	36	69	67	13	1
Число звезд класса светимости IV	11	31	32	13		
Число звезд других классов	21	12	21	7	(5)	1
Главная последовательность	0,26	0,46	0,57			
Общее число						

Здесь даны для разных спектральных классов предельное годичное собственное движение, соответствующее главной последовательности, вероятное число звезд класса светимости V и число звезд других классов светимости. Видно, что только четверть вновь открываемых двойных спектрального класса K принадлежит к главной последовательности, но половина объектов спектральных классов F и G приходится на главную последовательность.

Важно отметить, что звезды классов M и K главной последовательности, наблюдаемые как визуально-двойные, имеют большие вероятные собственные движения в соответствии с их большими вероятными параллаксами. Именно у этих двойных можно будет быстрее всего определить орбиты.

Вероятный период обращения двойной системы

Легко пояснить это последнее утверждение, записав уравнение, которое дает вероятный период пары как функцию наблюденных элементов в момент открытия.

Обратимся к уравнению (6.57), заменив параллакс его выражением через абсолютную звездную величину и записав выражение для периода. Тогда получим

$$\lg P = \frac{3}{2} \lg a'' + M_A (0,5k - 0,3) - 0,5 \lg D + \\ + 0,3 (m_{vA} + C_{vA}) - kM_\odot / 2 + \frac{3}{2},$$

или, подставляя численные значения (гл. 6), имеем

$$\lg P \approx 1,5 \lg a'' - 0,244M_A + 0,3 (m_{vA} + C_{vA}) + 0,028\Delta m + 1,08. \quad (7.16)$$

Это уравнение дает период как функцию наблюденных элементов и видимой большой полуоси орбиты при условии, что звезда удовлетворяет соотношению масса — светимость.

Поскольку ищутся порядки величины, можно принять в качестве видимой большой полуоси разделение компонентов в момент открытия системы $a'' = gp$. Тогда можно записать

$$\lg P \approx 1,5 \lg p - 0,244M_A + 0,028\Delta m + 0,3 (m_{vA} + C_{vA}) + h, \quad (7.17)$$

где $h = 1,08 + 1,5 \lg g$.

Величина h меняется в течение периода. Можно вычислить ее среднее значение для каждой пары, оно несильно отклоняется от 1,5. Для всего ансамбля двойных среднее значение h зависит от закона распределения элементов, особенно от эксцентриситета и наклонения орбиты. Поскольку эти законы плохо известны, определяют h , применяя уравнение (7.17) к двойным звездам

с известными орбитами. Но эти орбиты подвержены наблюдательной селекции, которая изменяет среднее значение h , поэтому нужно использовать большое число пар, для которых периоды и большие полуоси статистически известны. Это достаточно продолжительная работа, результаты которой суммированы в следующей таблице для звезд главной последовательности:

	A5	F0	F5	G0	G5	K0	K5	M0	M2
h	1,25	1,25	1,25	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,90

Изменение величины h со спектральным классом обусловлено наблюдательной селекцией. Оно означает, что пара спектрального класса A или F в среднем более далека от перигея в момент ее открытия, чем пара класса K или M. Вероятное уклонение в этих величинах составляет $\pm 0,13$. Это уклонение вызвано некоторым произволом в значениях h . Период, вычисленный таким образом, является вероятным периодом. Истинный период с вероятностью 0,5 заключен между 0,75 и 1,4 вероятного периода.

С помощью уравнения (7.17) можно оценить скорость орбитального движения пары уже в момент ее открытия, определять необходимую частоту наблюдений данной пары и выбирать двойные с короткими вероятными периодами, заслуживающие регулярных наблюдений в течение года. Кроме того, предыдущие рассуждения позволяют оценить класс светимости, а отсюда — абсолютную звездную величину, если известен спектральный класс.

Приводимая ниже таблица для звезд главной последовательности облегчает вычисление вероятных периодов. Она основана на данных Пекера и Шацмана (*Astrophysique générale*, Masson, 1959). В ней даны спектральный класс, абсолютная болометрическая звездная величина, масса μ согласно соотношению масса — светимость по Бэзу — Романи (гл. 6) и член $(0,5 k - 0,3) M$, который служит для вычисления вероятного периода со значением $k = 0,1117$.

Наконец, следующая маленькая таблица позволяет вычислить звездную величину компонента A как функцию разности звездных величин Δm и общей визуальной звездной величины системы $m_A = m_{vT} + d$:

Δm	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,5
d	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,2

Примеры. 1. Пара с известной орбитой ADS 8325 = Hu 731, $\alpha = 11^h49^m04^s$, $\delta = +48^\circ22'$ (1950).

Главная последовательность

<i>Спектр. класс</i>	<i>M</i>	<i>μ</i>	<i>(k/2 - 0,3)M</i>
G1	4,5	1,07	- 1,10
G2	4,7	1,02	- 1,15
G3	4,8	0,99	- 1,17
G4	5,0	0,94	- 1,22
G5	5,1	0,92	- 1,24
G6	5,3	0,87	- 1,29
G7	5,5	0,83	- 1,34
G8	5,6	0,81	- 1,37
G9	5,8	0,77	- 1,42
K0	6,0	0,73	- 1,46
K1	6,2	0,69	- 1,51
K2	6,5	0,66	- 1,56
K3	6,9	0,58	- 1,68
K4	7,2	0,54	- 1,76
K5	7,5	0,46	- 1,83
K6	7,9	0,45	- 1,93
K7	8,2	0,41	- 2,00
K8	8,5	0,38	- 2,07
K9	8,9	0,35	- 2,17
M0	9,2	0,32	- 2,24
M1	9,7	0,28	- 2,37
M2	10,1	0,25	- 2,46
M3	10,6	0,22	- 2,59
M4	11,3	0,19	- 2,76

<i>Спектр. класс</i>	<i>M</i>	<i>μ</i>	<i>(k/2 - 0,3)M</i>
B7	- 0,6	3,98	+ 0,15
B8	- 0,3	3,68	+ 0,07
B9	0	3,41	0
A0	+ 0,3	3,16	- 0,07
A1	0,9	2,71	- 0,22
A2	1,3	2,50	- 0,29
A3	1,7	2,15	- 0,44
A4	2,0	2,04	- 0,49
A5	2,2	1,94	- 0,54
A6	2,4	1,84	- 0,59
A7	2,6	1,75	- 0,63
A8	2,8	1,66	- 0,68
A9	2,9	1,62	- 0,71
F0	3,1	1,58	- 0,73
F1	3,2	1,50	- 0,78
F2	3,3	1,46	- 0,81
F3	3,4	1,42	- 0,83
F4	3,5	1,39	- 0,85
F5	3,6	1,35	- 0,88
F6	3,8	1,28	- 0,93
F7	3,9	1,25	- 0,95
F8	4,1	1,19	- 1,00
F9	4,2	1,16	- 1,02
G0	4,4	1,10	- 1,07

Общая видимая звездная величина $8,6^m$, $\Delta m = 0,2^m$, спектральный класс K0, следовательно, $M = 6,0^m$. Разделение в момент открытия $0,34''$, $m_{vA} + C_{vA} = 9,1^m$. Согласно таблице, $h = 1,50$, откуда вероятный период составляет 117 лет. Истинный период составляет 107 лет.

2. Пара с неизвестной орбитой, но заметным собственным движением ADS 1273 = A 944 AB, $\alpha = 1^h35^m00^s$, $\delta = +45^\circ45'$, 1950.

Общая видимая звездная величина $8,2^m$, $\Delta m = 0,3^m$, собственное движение $0,015''$, спектральный класс A0, следовательно, вероятный класс светимости V, $m_{vA} + C_{vA} = 8,4^m$, $M_A = 0,3^m$. Разделение в момент открытия $0,44''$.

Таблица дает: $h = 1,25$, откуда вероятный период равен 1500 лет. Пара проходит по орбите 20° за 65 лет.

3. Пара, открытая в 1971 г. Muller 224, $\alpha = 19^h40^m07^s$, $\delta = +76^\circ18'$ (1950).

Общая видимая звездная величина $8,0^m$, $\Delta m = 0,7^m$, собственное движение $0,20''$. Спектральный класс K0, следовательно, класс светимости V, $M_A = 6,0^m$, $m_{vA} + C_{vA} = 8,2^m$, разделение $0,17''$, $h = 1,50$; откуда вероятный период равен 23 годам.

Используя предыдущие таблицы и таблицу гл. 6, дающую балометрические поправки, легко применять уравнение (7.17) к любой паре и в любой момент; например в момент открытия.

Прежде всего замечаем, что только очень тесные пары с большой вероятностью обладают короткими периодами, следовательно, именно среди них нужно проводить исследования. Знание звездной величины не менее важно, чем знание спектрального класса. Пары с высокими температурами в левой части главной последовательности имеют более длинные периоды по сравнению с красными карликами.

В следующей таблице приведен список нескольких пар с короткими вероятными периодами, открытых недавно. В таблице даны обозначение пары (COU — Куто, M1g — Мюллер, WOR — Уорли), общая видимая звездная величина пары, взятая из каталога SAO, положение на небе для эпохи 1950 г., спектральный класс. Класс светимости не известен, но собственное движение всех этих пар таково, как в случае если бы они были образованы обычными карликами, за исключением COU 14, гиганта класса светимости III, у которого класс светимости уже известен. Далее указаны разделение ρ в момент открытия, год открытия, вероятный период и наблюденный период, определенный по дуге, пройденной компонентами по орбите. Периоды, напечатанные жирными цифрами, соответствуют уже вычисленным орбитам, а величины в скобках малонадежны.

Этот список содержит большое число потенциальных открытий, которые внесут существенный вклад в калибровку соотношения масса — светимость.

Недавно открытые короткопериодические двойные

	m_{vT}	α 1950 δ	Спектр. класс	ρ	Год открытия	Период, годы	
						вероятный	наблюдаемый
COU 854	8,3	0 ^h 58 ^m ,6 + 35°19'	F8V	0",17	1972	55	(60)
COU 1067	8,5	2 06 ,0 + 35 26	F5V	0 ,15	1973	68	
COU 79	5,6	2 12 ,9 + 24 49	F5V	0 ,25	1965	18	37
COU 1371	8,8	2 37 ,8 + 38 52	F2V	0 ,17	1975	40	
COU 691	8,5	3 39 ,1 + 31 31	F8V	0 ,14	1972	47	
COU 929	7,5	7 53 ,1 + 23 50	G0V	0 ,18	1973	34	(30)
COU 169	9,6	10 11 ,3 + 22 42	K5V	0 ,19	1967	36	85
COU 292	8,0	10 24 ,2 + 19 46	F8V	0 ,19	1968	49	43
COU 1260	9,0	11 19 ,4 + 37 21	G0V	0 ,18	1975	30	
WOR 24	9,4	13 29 ,7 + 31 25	M0V	0 ,36	1960	29	36
COU 606	9,4	14 11 ,6 + 31 14	M0V	0 ,18	1971	10	35
Mlr 347	8,8	15 32 ,4 + 84 41	K0V	0 ,17	1972	48	(45)
COU 798	8,6	15 32 ,6 + 27 05	G0V	0 ,16	1972	65	
COU 612	8,0	15 36 ,9 + 25 54	G5V	0 ,15	1971	32	33
COU 613	8,6	15 38 ,6 + 31 38	G5V	0 ,27	1971	101	(108)
COU 1445	7,5	15 40 ,2 + 42 13	F8V	0 ,22	1976	49	
COU 490	8,5	16 43 ,0 + 29 33	F5V	0 ,15	1972	68	(72)
Mlr 182	8,4	16 45 ,3 + 71 51	G5V	0 ,22	1971	65	(106)
COU 1289	7,8	16 56 ,7 + 39 47	G0V	0 ,14	1975	30	
COU 1291	8,5	17 05 ,8 + 38 14	G5V	0 ,14	1975	43	(10)
COU 1145	7,1	17 47 ,2 + 37 05	G0V	0 ,15	1974	21	(27)
COU 1462	9,1	19 07 ,1 + 33 59	K6V	0 ,20	1976	21	
COU 321	7,9	19 15 ,8 + 20 06	A5V	0 ,16	1968	111	60
Mlr 224	8,0	19 40 ,7 + 76 18	K0V	0 ,17	1971	23	(36)
COU 14	5,3	21 47 ,8 + 17 04	F2III	0 ,36	1959	75	31
COU 542	8,5	22 54 ,6 + 24 25	K0V	0 ,20	1970	49	44
Mlr 4	7,2	23 38 ,7 + 45 58	F5V	0 ,12	1953	20	20

Непрерывность наблюдений. Призыв к наблюдателям

Страна двойных звезд позволяет выбирать для изучения, объекты в зависимости от мощности инструмента. Конечно, поиски новых пар, равно как и измерение тесных двойных, остаются за мощными телескопами. Но множество двойных звезд, такие, как Кастор, γ Девы, ζ Рака, доступны наблюдениям со средними и даже скромными инструментами. Любитель всегда может выбрать для себя звезды; такие наблюдения, выполненные тщательно, будут полезны для науки. Любителем должно двигать не желание сделать открытие, но большая любовь к наблюдениям. Он главным образом работает ради этой любви.

В обществах любителей астрономии или на частных обсерваториях есть много инструментов малых и средних размеров. Несмотря на это, любители редко занимаются визуальными измерениями двойных звезд, они предпочитают фотографические наблюдения. Таким образом, визуальные измерения двойных звезд остаются за профессионалами. Профессионалы же не столь многочисленны, чтобы посвятить себя исключительно изучению двойных звезд.

Как это ни парадоксально, но из четырех миллиардов жителей Земли не более 6—7 человек занимаются регулярными измерениями двойных звезд. Конечно, для этой цели нужно иметь мощные не слишком загруженные инструменты, расположенные в местах с хорошим астроклиматом. Такие условия имеются почти во всех странах. Франция всегда была в авангарде в этой области наряду с Россией в XIX в. и США, где находятся крупнейшие инструменты. Африка тоже внесла большой вклад в эти исследования. Но молодежь увлекается разнообразными астрофизическими исследованиями в ущерб астрометрии, где нужно иметь склонность к продолжительным наблюдениям и проявлять настойчивость.

Смена поколений наблюдателей не обеспечивается автоматически. Те обсерватории, которые специализируются на изучении двойных звезд, из-за нехватки специальных астрономических кадров мало-помалу отказываются от этой области исследований и меняют свою специализацию. Можно было бы поручить эту работу некоторым обсерваториям с особым статусом. В Англии многие церковные деятели были выдающимися наблюдателями двойных звезд, например Эспин, который имел частную обсерваторию.

Во Франции в начале века в Эме около Лилля имелась обсерватория Жонкера, в которой с рефрактором 35 см было открыто более 1000 пар. Теперь она стала Астрономической лабораторией университета в Лилле и более не используется для

измерения двойных звезд. Даже национальные обсерватории доверяли крупные инструменты любителям, что часто практикуется в США. Бэз, медик по профессии, выполнил более 20 000 измерений на рефракторах с диаметрами объектива 30 и 38 см в Париже до своей отставки и возвращения в родную Нормандию.

Обсерватория в Ницце — единственная во Франции, программа которой полностью посвящена наблюдениям двойных звезд. Нельзя быть уверенным, что в будущем она сохранит свой профиль, поскольку научные программы зависят от ученых советов, реагирующих на новые веяния, любящих изменения и порой ненавидящих прошлое.

Изучение двойных звезд требует непрерывных наблюдений, выполняемых в течение нескольких веков — времени, значительно превосходящего продолжительность человеческой жизни, но не группы, состоящей из людей разных поколений, которая посвящает себя этому труду и потому остается стабильной в течение многих лет. Таким путем были бы обеспечены длительные ряды наблюдений, тем более, что содержание рефрактора, даже крупного, мало обременительно, а визуальные наблюдения не требуют никаких дополнительных затрат.

Такие группы людей существуют, например, в монастырях. Они прекрасно расположены, и хороший телескоп, финансируемый меценатами, нашел бы там надежное пристанище и применение, если его установить в башне, выстроенной поблизости или на территории монастыря. Он мог бы обслуживаться одним или двумя монахами-астрономами, для обучения которых достаточно было бы лишь кратковременной стажировки на обсерваториях. Небольшая библиотека, один или два дешевых микрокалькулятора дополнили бы научное оборудование. Впрочем, астрономическая обсерватория чем-то сродни монастырю — ведь она дает пищу для размышлений и укрепляет дух.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Библиографией к этой главе служит библиография всех предыдущих глав. Добавим лишь следующие издания:

Coutreau P. État actuel; sur la découverte des étoiles doubles visuelles, Science, Revue de l'association française pour l'avancement des sciences, II, No. 4, 242, 1971.

Coutreau P. La mesure des étoiles doubles visuelles, Astrophys. and Space Sci., 11, 7, 1971.

Coutreau P. Contribution à l'étude du dénombrement des étoiles doubles visuelles, J. Obs., 43, No. 3, 41, 1960.

Coutreau P. La Recherche d'étoiles doubles. Sa motivation, Astron. Astrophys., 13, 345, 1971.

Heintz W. D. A statistical study of binary stars, J. Roy. Astron. Soc. Canada, 63, No. 6, 275, 1969.

Звезды, открытые автором к настоящему времени (общее число 1500), опубликованы в 14 сериях:

1. J. Obs., 49, No 6, 220, 1966. (COU 34—72.)

2. J. Obs., 50, f. 1, 33, 1967, (COU 73—145.)
3. J. Obs., 51, f. 1, 31, 1968. (COU 146—245.)
4. A. and A S. S., 1, 105, 1970. (COU 246—345.)
5. A. and A S. S., 1, 419, 1970. (COU 346—445.)
6. A. and A S. S., 5, 167, 1972. (COU 446—545.)
7. A. and A S. S., 6, 177, 1972. (COU 546—645.)
8. A. and A S. S., 6, 419, 1972. (COU 646—745.)
9. A. and A S. S., 10, 273, 1973. (COU 746—845.)
10. A. and A S. S., 12, 137, 1973. (COU 846—945.)
11. A. and A S. S., 15, 253, 1974. (COU 946—1045.)
12. A. and A S. S., 20, 379, 1975. (COU 1046—1200.)
13. A. and A S. S., 24, 495, 1976. (COU 1201—1350.)
14. В печати COU 1350—1500.

Звезды, открытые Мюллером (общее число 565), опубликованы в следующем издании:

Muller P. Résultats préliminaires d'une recherche systématique d'étoiles doubles nouvelles entre + 60° et la pôle Boréal, Publ. Obs. Paris, Juin 1973.

Здесь содержится 407 первых пар. Данные о других парах опубликованы в *Circulaires d'Information de la Comission des Etoiles Doubles de l'UAI.*

- Circ. No 60, juillet 1973. (Mlr 408—430.)
- Circ. No 61 novembre 1973. (Mlr 431—479.)
- Circ. No 62 mars 1974. (Mlr 480—499.)
- Circ. No 64, janvier 1975. (Mlr 500—522.)
- Circ. No 67, novembre 1975. (Mlr 523—542.)
- Circ. No 70 novembre 1976. (Mlr 543—565.)

Югославские астрономы в Белградской обсерватории открыли в последнее время 120 двойных звезд с 65-сантиметровым рефрактором

Popovic G. M. The First General Catalogue of Double Stars Observations Made in Belgrade 1951—1971, Publ. Obs. Belgrade, No.19, 1974.

Глава 8

КАТАЛОГ 744 ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД, ДОСТУПНЫХ ИНСТРУМЕНТАМ ВСЕХ РАЗМЕРОВ

Зачем нужен каталог?

Вид двойной звезды в телескоп никого не оставляет равнодушным. Каждый инструмент позволяет наблюдать тысячи пар. Любитель имеет богатый выбор, чтобы удовлетворять свое любопытство и любовь к наблюдениям, проверить зрение и качество своего оборудования.

Но кроме того, нужно располагать подходящим каталогом, не очень громоздким и не очень маленьким, в котором наблюдатель мог бы найти для каждой ночи года объекты, соответствующие по трудности его возможностям. Такие каталоги издавались, особенно в США. Во Франции можно найти списки двойных звезд, принадлежащих к разным созвездиям, в книге К. Фламмариона *Les Étoiles et les Curiosités du Ciel (Marpon and Flammarion, 1882)*. Но это издание стало библиографической редкостью и устарело. Автор приводит описание каждой пары, видимой в инструменты той эпохи, с оценкой цветов по отношению к цветам драгоценных камней. Современные каталоги менее поэтичны, но техническая сухость не является препятствием к лиризму и мечтаниям.

Во Франции можно найти списки двойных звезд, составленные Бэзом и опубликованные в ежегодниках Фламмариона. К сожалению, эти издания в настоящее время выходят в меньшем объеме и списки двойных звезд из них исключены. Отметим также серию статей, опубликованных в *Bulletin de la Société astronomique de France*, озаглавленную *La Revue des Constellations*. Эти статьи изданы отдельным сборником. В последнее время Мюллер опубликовал список двойных звезд для любителей в выпуске *Bulletin* за июль 1976 г. Там можно найти параметры 76 наиболее интересных объектов, сопровождаемые замечаниями и комментариями.

Но телескопы с отверстием от 25 до 30 см получают все большее распространение. Они позволяют производить наблюдения огромного числа объектов. Следовательно, нужно снабдить наблюдателей настоящим каталогом, в котором они могли бы выбрать подходящие объекты.

Цель этого каталога двойная: дать полный список наиболее ярких пар, которые легко отождествлять, а также дать точные разделения, чтобы можно было определить фокусное расстояние инструмента фотографическим методом. В самом деле, любитель все более и более увлекается фотографическими наблюдениями, если он хочет принести пользу, ему нужно прокалибровать свое поле зрения. Широкие пары представляют чудесную возможность для такой калибровки.

Описание каталога

В каталоге приведены 744 объекта, расположенные в порядке возрастания прямого восхождения. В столбцах даны:

1. Порядковый номер. В случае особенно интересной пары номеру предшествует звездочка.

2. Обозначение двойных звезд в соответствии с сокращениями, принятыми в центральной картотеке в Вашингтоне. Главные из них следующие:

A	Эйткен	Hi	Хасси
BU	Бернхем	I	Иннес
COU	Куто	KUI	Койпер
Da	Дос	M1g	Мюллер
h и H	В. Гершель	STF	В. Струве
No	Хок	STT	О. Струве

3. Обозначение звезды в созвездии.

4. Координаты для эпохи 1950 г. с точностью до десятых долей минуты времени.

5. Видимые звездные величины компонентов. За исключением некоторых редких случаев, главные компоненты ярче 8^m, вторичные — ярче 10^m.

6. Позиционные углы, округленные до градуса.

7. Разделения компонентов.

8. Соответствующий год наблюдения. Иногда эти данные заменены эфемеридой, вычисленной, исходя из определенной орбиты.

9. Буква N означает, что имеются пояснительные замечания.

В пояснительных замечаниях даны, когда это возможно, первые измерения и эфемериды для уточнения путем экстраполяции и разделение в момент наблюдений. Многие из этих пар прошли очень небольшую дугу по орбите с момента их открытия. Здесь приведены, в частности, пары, отобранные Мюллером по списку *Nouvelles Distances fondamentales d'etoiles double* (J. Obs., p. 1, 1949). Автор составил также такой список для очень тесных пар (*Astron Astrophys.*, p. 126, 1969), но они в основном недоступны любительским инструментам. Разделения компонентов

тщательно определены, чтобы дать возможность проводить строгий контроль калибровки поля зрения инструментов.

Для некоторых звезд приведены цвета по Фламмариону и минимальные апертуры, при которых пары хорошо видны.

Советы наблюдателям

Многие звезды каталога видны невооруженным глазом и наведение на них не представляет большого труда. Но любитель не всегда располагает экваториальной монтировкой с разделенными кругами. В этом случае нужно иметь большой опыт работы на данном инструменте и принимать некоторые меры предосторожности при наблюдениях.

Карта неба окажет наибольшую помощь при наблюдениях, она позволяет наводить телескоп на объекты, невидимые невооруженным глазом, с помощью процедуры выстраивания звезд, которая выполняется после нанесения на карту звезды по ее координатам. Это легче осуществимо с рефрактором. Рекомендуется установить на азимутальной монтировке круги, разделенные по азимуту и по высоте. Чтобы навести телескоп на звезду в этих условиях, надо отметить время прохождения через меридиан яркой звезды, затем определить часовые углы двойных звезд вблизи меридиана; поставив высоту $(b + L)$, где L — дополнение широты места до 90° , можно найти искомый объект легким покачиванием инструмента.

Автор этих строк говорит об этом со знанием дела, поскольку во время летнего отпуска он сам — не более чем любитель астрономии, имеющий в своем распоряжении рефрактор с диаметром объектива 10 см на азимутальной монтировке без искателя. Несмотря на это, автору удавалось наблюдать в окуляр двойные звезды, причем некоторые из них очень слабые и невидимые невооруженным глазом.

Зеркалу 40 см диаметром доступны почти все объекты каталога и многие не приведенные в нем объекты. Если любитель хорошо оснащен и хочет пойти дальше простых наблюдений, ему нужно записывать и систематизировать свои измерения, тем самым он принесет пользу науке о двойных звездах.

Оглавление

От переводчика	5
Предисловие	7
Предисловие автора	11
Глава 1. ИСТОРИЯ ИЗУЧЕНИЯ ДВОЙНЫХ ЗДЕЗД	14
Двойные звезды по Вселенной	14
Практическая значимость наблюдений двойных звезд . .	17
Предшественники. Отец и сын Гершели	20
Первые представители современной эпохи. Отец и сын Струве	21
Эпоха великих пионеров	22
Современные изыскания	25
Поиски на южной полусфере	26
Двойные звезды, открытые по фотографиям	27
Двойные звезды с большим общим собственным движением	28
Великие наблюдатели двойных звезд	28
Централизация измерений	32
Общие характеристики ансамбля известных двойных звезд	33
Краткая библиография	34
Глава 2. ПОНЯТИЯ ИЗ ОПТИКИ, НЕОБХОДИМЫЕ НАБЛЮДАТЕЛЮ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД	36
Основной инструмент. Телескоп-рефрактор	36
Увеличение. Выходной зрачок	37
Изображение, даваемое круглым объективом. Разрешающая способность. Разрешающее увеличение. Полезное увеличение	39
Структура изображения тесной двойной	41
Светосила	48
Краткая библиография	50
Глава 3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	51
<i>Визуальные измерения</i>	51
Принцип измерения двойной звезды	51
Необходимые меры предосторожности для определения начала отсчета углов	52
Нитяные микрометры	53
Микрометры со звездой сравнения	57
Звездные интерферометры. Интерферометр Физо—Майкельсона	58
Интерференционный микрометр, работающий в режиме полуволны	59
Микрометр двойного изображения Мюллера	60

Микрометр двойного изображения Лио и Камишеля	64
<i>Фотографические наблюдения двойных звезд</i>	64
Оптическая фотонная камера	64
Оптическая электронная камера	67
<i>Современная интерферометрия</i>	68
Автоматический интерферометр Уикса	68
Интерферометр Лябери (счетчик фотонов)	69
Интерферометр интенсивностей Брауна	71
<i>Наблюдения двойных звезд методом лунных покрытий</i>	73
<i>Наблюдения двойных звезд методом фотоэлектрического сканирования изображения</i>	74
Краткая библиография	75
Глава 4. НЕСКОЛЬКО ПРАКТИЧЕСКИХ СОВЕТОВ	77
Приготовления к наблюдательной ночи	77
Предосторожности, необходимые при обращении с телескопом	79
Атмосферная турбулентность	85
Практические советы визуальному наблюдателю двойных звезд	88
Наблюдения искусственных небесных объектов	94
Краткая библиография	96
Глава 5. ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ ЗВЕЗД	97
Трудности отождествления звезд	97
Фундаментальные каталоги	98
Промежуточные каталоги	98
Общие каталоги	101
Специальные каталоги	107
Библиографические замечания	109
Глава 6. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОРБИТ И ЗВЕЗДНЫХ МАСС	111
Для чего наблюдаются двойные звезды	111
Истинная орбита	111
Видимая орбита	113
Вычисление элементов орбиты двойной звезды	119
Вычисление масс звезд	143
Динамические параллаксы	156
Библиографические замечания	161
Глава 7. ПУТЕШЕСТВИЕ В СТРАНУ ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД	164
Несколько типичных систем	164
Возможности путешествия в зависимости от инструмента	168
Проникновение в глубь пространства с помощью инструмента	170
Число орбит, доступных инструменту	173
Возможности глаза по сравнению с инструментами	176
Путешествие астрономов обсерватории в Ницце на борту экономичного космического корабля	177
Определение классов светимости вновь открытых двойных звезд	179
Вероятный период обращения двойной системы	182

ОГЛАВЛЕНИЕ

Непрерывность наблюдений. Призыв к наблюдателям	187
Библиографические замечания	188
Глава 8. КАТАЛОГ 744 ДВОЙНЫХ ЗДЕЗД, ДОСТУПНЫХ ИНСТРУ- МЕНТАМ ВСЕХ РАЗМЕРОВ	190
Зачем нужен каталог?	190
Описание каталога	191
Советы наблюдателям	192

Уважаемый читатель!

Ваши замечания о содержании книги, ее оформлении, качестве перевода и др. просим присыпать по адресу: 129820, Москва, И-110, ГСП, 1-й Рижский пер., д. 2, издательство «Мир».

Поль Куто
НАБЛЮДЕНИЯ
ВИЗУАЛЬНО-ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД

Научный редактор М. Рутковская

Художник Ю. Лылов

Художественный редактор М. Кузьмина

Технический редактор Е. Ящук

Корректор Н. Гиря

ИБ № 2517

Сдано в набор 08.01.81. Подписано к печати 25.05.81.
Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 2. Гарнитура
литературная. Ё Печать высокая. Объем 7,50 бум. л.
Усл. печ. л. 15,00. Усл. кр.-отт. 15,00. Уч.-изд. л. 13,91.
Изд. № 27/1043. Тираж 4800 экз. Зак. 406. Цена 1 р. 80 к

ИЗДАТЕЛЬСТВО «МИР»

Москва, 1-й Рижский пер., 2

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного
Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга»
им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государ-
ственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии
и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистиче-
ская ул., 14.